



Universidade de Aveiro

Ano 2017

Departamento de Engenharia Mecânica

**Pedro César Dinis
Simões**

**Análise da correlação entre resultados experimentais e
numéricos de NVH em bombas de óleo**



**Pedro César Dinis
Simões**

**Análise da correlação entre resultados experimentais e
numéricos de NVH em bombas de óleo**

Relatório apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Prof. Doutor António Manuel Godinho Completo, Professor Auxiliar com Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e da Doutora Ana Conceição, técnica especialista na Renault-Cacia.

O júri

presidente

Prof. Doutor António Gil D'Orey de Andrade Campos

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

vogais

Prof. Doutor António Manuel Godinho Completo

Professor Auxiliar com Agregação da Universidade de Aveiro (orientador)

Prof. Doutor José Luís Soares Esteves

Professor Auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Agradecimentos

Os meus primeiros agradecimentos vão para a Universidade da Aveiro, pelo seu contributo na minha formação académica e pessoal e para a Renault-Cacia, por me ter facultado este estágio e pela forma afável como fui recebido nas suas instalações.

Um muito obrigado aos meus pais, que ao longo destes cinco anos, sempre me incentivaram e apoiaram na concretização dos meus objetivos.

Agradeço também à Ana, pela disponibilidade constante, pela ajuda e orientação dada dentro da empresa e ao Professor Doutor António Completo, pelo apoio e orientação proporcionada durante a realização deste trabalho.

Por fim, agradeço aos meus amigos e ao B&C pelos bons momentos que proporcionaram ao longo do meu percurso académico.

palavras-chave

NVH, ruído, bomba de óleo de cilindrada variável, LMS, GT-Suite, *fluidborne Noise*, transformadas de Fourier, domínio da frequência, domínio do tempo, harmónicos, decibel, Banco RO6, bomba de palhetas

resumo

O presente trabalho aborda o problema do NVH (Noise Vibration and Harshness) em bombas de óleo. Neste âmbito, é realizada numa fase inicial uma descrição das bombas de óleo quanto à sua constituição e princípio de funcionamento, sendo que a bomba utilizada neste trabalho é uma bomba de palhetas de cilindrada variável. A utilização destas bombas acarreta a vantagem de permitir uma melhor eficiência do motor do veículo, logo a tendência para as utilizar e estudar é cada vez maior. Assim, este trabalho teve como objetivo perceber a correlação existente entre os dados numéricos e experimentais de NVH provocado por uma bomba de cilindrada variável. A componente de NVH estudada foi o ruído com origem no fluido (*fluidborne noise*), que neste caso é o óleo. Relativamente às bombas de óleo este tipo de ruído é provocado pela pulsação da pressão na zona de descarga. Ao sinal desta pulsação, que tem como unidades o bar em função do tempo, foram aplicadas as transformadas de Fourier para passar para o domínio da frequência e uma fórmula para converter o sinal para a escala de decibel. O *software* utilizado para o efeito foi o LMS Test.Lab da Siemens. Os dados de simulação obtiveram-se a partir de um modelo previamente criado no seio da empresa com o *software* GT-Suite. Os dados experimentais foram obtidos pela utilização de um banco de ensaios presente na Renault – Cacia, o banco RO6. Comparam-se os valores da frequência dos harmónicos teóricos e numéricos, concluindo-se que existe uma boa correlação entre estes. Verificou-se igualmente que o valor na frequência dos harmónicos do sinal experimental é coincidente com os dois anteriores. Pode-se afirmar que nesta parte o modelo numérico traduz bastante bem aquilo que ocorre na realidade e, portanto, é válido relativamente ao valor da frequência nos harmónicos. Complementarmente analisou-se o sinal numérico ao longo da velocidade de rotação da bomba e ao longo do espectro da frequência onde se compararam sinais com diferentes temperaturas (20°C e 80°C) e modos de configuração da electroválvula (ON e OFF). É possível concluir que segundo o modelo numérico o ruído nos harmónicos tem um comportamento crescente e linear até cerca das 2200 rpm, depois desta velocidade torna-se difícil de arranjar um padrão para o seu comportamento na medida em que este depende mais das condições de temperatura do óleo e estado da electroválvula da bomba. Das comparações entre os dados numéricos e experimentais verificou-se que ocorre uma correspondência razoável, com valores de correlação entre 0.69 e 0.85 de correlação. Verificou-se ainda que o valor dos harmónicos numéricos é quase sempre superior aos experimentais e que os resultados foram melhores quando a electroválvula se encontra no modo de configuração ON do que em OFF.

keywords

NVH, noise, variable displacement oil pump, LMS, GT-Suite, fluidborne noise, Fourier transform, frequency domain, time domain, harmonics, decibel, RO6 bench, vane pump

abstract

The present work approaches the problem of NVH (Noise Vibration and Harshness) in oil pumps. In this context, it was made, in an initial phase, a characterization of the constitution and working principle of some oil pumps, like the variable displacement oil pump used in this work. This type of pumps has the advantage of improving the engine's efficiency, thus the tendency to apply and study them is increasing. So, this work had as its main objective to analyse the correlation between the numerical and experimental data of NVH produced by a variable displacement oil pump. The NVH component studied was the fluidborne noise, that is, the noise that has its origin in the fluid, that in this case is the oil. In an oil pump this type of noise is caused by the pressure pulsation at the discharge zone. The Fourier transform is applied to the signal that contains this pressure pulsation, which afterwards is converted to the decibel scale. The software used to make this procedure was LMS Test.Lab created by Siemens. The simulation data were obtained from a model previously created by the company using the software GT-Suite. The experimental data were obtained using a test bench from Renault – Cacia, the RO6 bench. The frequency values of the theoretical and numerical harmonics were compared and it was concluded that they have a good correlation. It was also found that the value of the frequency of the experimental signal coincides with the two previous ones. Therefore, it can be affirmed that in this part the numerical model translates well what occurs in reality, thus it is valid relatively to the frequency value of the harmonics. In addition, it was analysed the numerical signal throughout the pump speed and the frequency spectrum where were compared different signals with different temperatures of the oil (20°C e 80°C) and modes of the configuration of the electrovalve (ON and OFF). It was possible to conclude that, according to the numerical model, the noise in the harmonics has a growing and linear behaviour until about the 2200 rpm. After this speed it becomes difficult to find a pattern because the noise depends more of the temperature of the oil and the mode that the electrovalve is in. From the comparison between the numerical and experimental data it was verified that it occurs a reasonable correspondence, with correlation values between 0.69 and 0.85. It was also found that the value of the harmonics is higher in the numerical data than in experimental data and that the results were better when the electrovalve is ON than when it is OFF.

Conteúdo

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento	1
1.1.1	Renault	2
1.2	Objetivo.....	2
1.3	Organização.....	3
2	Bombas de óleo.....	5
2.1	Introdução.....	5
2.2	Conceitos (tipos de bombas).....	6
2.2.1	Bombas hidráulicas de engrenagens com dentado exterior	7
2.2.2	Bombas hidráulicas de engrenagens com dentado interior sem separador (Trocoides).....	8
2.2.3	Bombas hidráulicas de palhetas.....	9
2.2.4	Bombas produzidas e utilizadas pela Renault.....	15
2.3	Mercado	16
2.3.1	Principais fabricantes de bombas de óleo	16
2.3.2	Previsões de mercado	18
2.4	Eficiência das bombas de óleo de cilindrada variável e repercussões ambientais.....	18
3	Vibrações, Ruído e Aspereza.....	21
3.1	Introdução.....	21
3.2	Aproximação teórica à análise de vibrações e ruído	21
3.2.1	Conceitos de ondas	21
3.2.2	Fundamentos das vibrações.....	23
3.2.3	Pressão sonora e ruído.....	26
3.3	Ferramentas Numéricas e Experimentais usadas nos estudos de NVH.....	30
3.3.1	Ferramentas Numéricas	30
3.3.2	Ferramenta Numérica utilizada na Renault e breve explicação do seu princípio de funcionamento.....	33
3.3.3	Ferramentas Experimentais	35
3.4	Levantamento de estudos realizados sobre tema NVH.....	37
3.4.1	Estudos NVH em bombas de óleo	37
3.4.2	Outros estudos	41
4	Análise dos dados numéricos e sua correlação com os dados experimentais	45
4.1	Introdução.....	45

4.2	Tratamento do sinal	45
4.2.1	Importação e conversão dos dados numéricos em Matlab	45
4.2.2	Tratamento do sinal em LMS	46
4.3	Análise do sinal de simulação	49
4.3.1	Condições do estudo	49
4.3.2	Correlação entre os harmônicos teóricos e numéricos da bomba	49
4.3.3	LMS vs. GT-Suite	50
4.3.4	Análise do ruído em função da velocidade de rotação	51
4.3.5	Análise do ruído em função do espectro da frequência	52
4.4	Método experimental e aquisição dos dados	55
4.4.1	Banco de ensaios RO6	56
4.4.2	Procedimento Experimental	58
4.4.3	Aquisição do sinal (Signature Acquisition)	60
4.5	Comparação dos resultados Numéricos vs. Experimentais	62
4.5.1	Resultados experimentais	62
4.5.2	Comparação e correlação dos dados experimentais com os numéricos	64
4.5.3	Matlab vs LMS	67
5	Conclusões e trabalhos futuros	69
5.1	Conclusões	69
5.2	Trabalhos futuros	70
6	Referências	71
7	Anexos	75

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 Comparação entre os valores de pressão sonora em Pa e dB. Adaptado de [27]	27
Tabela 4.1 Principais características do banco RO6. Adaptado de [45].....	58
Tabela 6.1 Harmónicos teóricos vs. harmónicos numéricos	80
Tabela 6.2 Valores de ruído numéricos para T=20°C, EV OFF e 1º Harmónico	80
Tabela 6.3 Valores de ruído numéricos para T=20°C, EV OFF, 2º Harmónico	80
Tabela 6.4 Valores de ruído numéricos para T=20°C, EV ON e 1º Harmónico	81
Tabela 6.5 Valores de ruído numéricos para T=20°C, EV ON e 2º Harmónico	81
Tabela 6.6 Valores de ruído para T=80°C, EV OFF, e 1º Harmónico	81
Tabela 6.7 Valores de ruído para T=80°C, EV OFF e 2º Harmónico	81
Tabela 6.8 Valores de ruído numéricos para T=80°C, EV ON e 1º Harmónico	82
Tabela 6.9 Valores de ruído numéricos para T=80°C, EV ON e 2º Harmónico	82
Tabela 6.10 Valores de ruído numéricos para 2200 RPM e T=20°C	82
Tabela 6.11 Valores de ruído numéricos para 2200 RPM e T=80°C	82
Tabela 6.12 Valores de ruído numéricos para 3000 RPM e T=20°C	83
Tabela 6.13 Valores de ruído numéricos para 3000 RPM e T=80°C	83
Tabela 6.14 Valores de ruído numéricos para 4000 RPM e T=20°C	83
Tabela 6.15 Valores de ruído numéricos para 4000 RPM e T=80°C	83
Tabela 6.16 Valores de ruído para 2200 rpm, EV OFF, T=80°C.....	85
Tabela 6.17 Valores de ruído para 2200 rpm, EV ON, T=80°C.....	87
Tabela 6.18 Valores de ruído para 3000 rpm, EV OFF, T=80°C.....	90
Tabela 6.19 Valores de ruído para 3000 rpm, EV ON, T=80°C.....	92
Tabela 6.20 Valores de ruído para 4000 rpm, EV OFF, T=80°C.....	94
Tabela 6.21 Valores de ruído para 4000 rpm, EV OFF, T=80°C.....	97

Lista de Figuras

Figura 1.1 Bomba inventada por Arquimedes [1]	1
Figura 1.2 Primeiro símbolo da Renault sobre a forma de diamante (1924) [2]	2
Figura 2.1 Circuito de lubrificação do motor [3].	5
Figura 2.2 Sistema de ativação da bomba por corrente [5].....	6
Figura 2.3 Hierarquia das bombas hidráulicas	6
Figura 2.4 Bomba hidráulica de engrenagens com dentado exterior. Adaptado de [7].....	7
Figura 2.5 Regulação de pressão direta (à esquerda) e regulação de pressão indireta (à direita). Adaptado de [5]	8
Figura 2.6 Ciclo de funcionamento de uma bomba hidráulica de engrenagens com dentado interior sem separador (Trocoide) [5].....	8
Figura 2.7 Bomba de palhetas de cilindrada fixa. Adaptado de [9].	9
Figura 2.8 Bomba hidráulica de palhetas equilibrada [5]	10
Figura 2.9 Aplicação de um anel no centro do rotor [5]	10
Figura 2.10 Tecnologia de controlo da cilindrada em rotação (à esquerda) e em translação (à direita). Adaptado de [5].....	11
Figura 2.11 Bomba de óleo de palhetas de cilindrada variável. Adaptado de [11]	12
Figura 2.12 Equilíbrio de forças no estator [5].....	12
Figura 2.13 Ilustração do princípio de funcionamento da regulação hidráulica [5].	13
Figura 2.14 Bomba de óleo de palhetas de cilindrada variável com regulação hidráulica a 2 níveis passiva. Adaptado de [5].....	14
Figura 2.15 Esquema do sistema de regulação termo hidráulica e seus principais responsáveis. Adaptado de [5]	14
Figura 2.16 Regulação hidráulica a 2 níveis passiva controlada por electroválvula [5].....	15
Figura 2.17 Bomba K9 (A), Bomba H4 (B), Bomba M9T (C) e bomba R9M (D)	15
Figura 2.18 Bomba de óleo de alhetas fabricada pela Mahle [13]	16
Figura 2.19 Bomba de óleo tricoide dupla produzida pela SHW [15].....	17
Figura 2.20 Bomba de óleo trocoide usada pela Infiniti e fabricada pela Hitachi	17
Figura 2.21 Bomba de óleo trocoide produzida pela AISIN	17
Figura 2.22 Bomba de óleo do Ferrari 458	18
Figura 2.23 Comparação do consumo de energia entre diferentes tipos de bombas. Adaptado de [20]	19
Figura 2.24 Redução do consumo de combustível. Adaptado de [20]	19
Figura 3.1 Onda sinusoidal. Adaptado de [25].....	22
Figura 3.2 Gráfico representativo do ponto de ressonância de uma suspensão [24]	22
Figura 3.3 Representação de um sistema com um grau de liberdade [22]	24
Figura 3.4 Amplitude da resposta de um sistema de um grau de liberdade com vibração forçada. Adaptado de [22]	26
Figura 3.5 Combinação de duas ondas sinusoidais puras com frequência de 350 Hz e 440 Hz [27]	27
Figura 3.6 Ouvido humano. Adaptado de [29].....	29
Figura 3.7 Região audível do som. Adaptado de [30]	30
Figura 3.8 Radiação acústica de um motor de um camião simulada em Actran [31].....	31
Figura 3.9 Interatividade entre o software PULSE e o utilizador [32].....	32
Figura 3.10 Modelação da rede hidráulica do injetor de combustível em LMS Imagine.LAB Amesim e comparação dos resultados numéricos com os experimentais. Adaptado de [34] ...	32

Figura 3.11 Bomba de óleo H4.....	33
Figura 3.12 Simulador das pulsações de pressão da bomba H4.....	34
Figura 3.13 Pressão simulada da bomba ao longo do circuito do óleo	35
Figura 3.14 Acelerómetro piezoelétrico. Adaptado de [38]	35
Figura 3.15 Acelerómetro da PCB Piezotronics de 3 eixos usado na Renault.....	36
Figura 3.16 Microfone Condensador. Adaptado de [39]	37
Figura 3.17 Malha da bomba, seus componentes e ar envolvente. Adaptado de [40]	38
Figura 3.18 Resultados numéricos de ruído (dB)	38
Figura 3.19 Gráfico de comparação dos resultados experimentais com os numéricos a 1000 rpm. Adaptado de [40].....	39
Figura 3.20 Nível de vibrações e ruído em função da frequência e da velocidade de rotação. Adaptado de [41]	40
Figura 3.21 Nível de ruído, para as pressões de 50 bar (esquerda) e 80 bar (direita). Adaptado de [42]	40
Figura 3.22 Resultados experimentais para as velocidades: 1000 rpm (a preto), 2000 rpm (a verde), 3000 rpm (a azul escuro), 4000 rpm (a azul claro). Adaptado de [42]	41
Figura 3.23 Locais de medida dos dados relativos às vibrações	42
Figura 3.24 Nível do ruído na cabine dianteira e traseira em função da velocidade do veículo. Adaptado de [43]	42
Figura 3.25 HAV em função da velocidade. Adaptado de [43]	42
Figura 3.26 WBV em função da velocidade. Adaptado de [43]	43
Figura 4.1 Diagrama com as etapas do tratamento de sinal	46
Figura 4.2 Sinal da pulsação da pressão (bar) em função do tempo (s) (à esquerda) e senoide representativa da frequência das pulsações de pressão (à direita)	47
Figura 4.3 Amplitude do sinal da pulsação de pressão em função da frequência (Hz)	48
Figura 4.4 Sinal de ruído (dB) numérico em função da frequência (Hz)	48
Figura 4.5 Gráfico de correlação entre os harmónicos teóricos e numéricos	49
Figura 4.6 Gráficos de comparação e de correlação entre o GT-Suite e LMS para T=80°C, EV OFF e 1º Harmónico	50
Figura 4.7 Gráficos de comparação e de correlação entre o GT-Suite e LMS para T=20°C, EV ON e 2º Harmónico	50
Figura 4.8 Ruído (dB) em função da velocidade de rotação (rpm) para o 1º Harmónico (à esquerda) e para o 2º Harmónico (à direita)	51
Figura 4.9 Gráficos de comparação do ruído para diferentes temperaturas do óleo (20°C vs. 80°C), com uma velocidade de 2200 rpm, com EV ON (à esquerda) e com EV OFF (à direita)..	52
Figura 4.10 Gráficos de comparação do ruído para diferentes temperaturas do óleo (20°C vs. 80°C), com uma velocidade de 3000 rpm, com EV ON (à esquerda) e com EV OFF (à direita)..	53
Figura 4.11 Gráficos de comparação do ruído para diferentes temperaturas do óleo (20°C vs. 80°C), com uma velocidade de 4000 rpm, com EV ON (à esquerda) e com EV OFF (à direita)..	53
Figura 4.12 Gráficos de comparação do ruído para diferentes modos de configuração da electroválvula (EV ON vs. EV OFF), com uma velocidade de 2200 rpm, com temperatura do óleo a 20°C (à esquerda) e 80°C (à direita)	53
Figura 4.13 Gráficos de comparação do ruído para diferentes modos de configuração da electroválvula (EV ON vs. EV OFF), para uma velocidade de 3000 rpm, com a temperatura do óleo a 20°C (à esquerda) e 80°C (à direita)	54

Figura 4.14 Gráficos de comparação do ruído para diferentes modos de configuração da electroválvula (EV ON vs. EV OFF), para uma velocidade de 4000 rpm, com a temperatura do óleo a 20°C (à esquerda) e 80°C (à direita)	54
Figura 4.15 Banco de ensaios RO6	56
Figura 4.16 Tanque do óleo (à esquerda) e manivela de ajustamento do ângulo do braço (à direita)	57
Figura 4.17 Cabine de potência (à esquerda) e grupo de termorregulação (à direita)	57
Figura 4.18 Esquema da montagem experimental	58
Figura 4.19 Banco RO6	59
Figura 4.20 Sonda de pressão montada no banco	59
Figura 4.21 Condicionador de sinal (à esquerda) e fonte de tensão (à direita)	60
Figura 4.22 Etapas para a aquisição dos dados	60
Figura 4.23 Parâmetros do Tracking	61
Figura 4.24 Display do Measure	62
Figura 4.25 Sinal da pulsação de pressão experimental (bar) em função do tempo (s)	63
Figura 4.26 Sinal do ruído experimental (dB) em função da frequência (Hz)	63
Figura 4.27 Gráficos de comparação (à esquerda) e correlação (à direita) entre os dados numéricos e experimentais para uma velocidade de 2200 rpm, T=80°C e EV OFF	64
Figura 4.28 Gráficos de comparação (à esquerda) e correlação (à direita) entre os dados numéricos e experimentais para uma velocidade de 2200 rpm, T=80°C e EV ON	64
Figura 4.29 Gráficos de comparação (à esquerda) e correlação (à direita) entre os dados numéricos e experimentais para uma velocidade de 3000 rpm, T=80°C e EV OFF	64
Figura 4.30 Gráficos de comparação (à esquerda) e correlação (à direita) entre os dados numéricos e experimentais para uma velocidade de 3000 rpm, T=80°C e EV ON	65
Figura 4.31 Gráficos de comparação (à esquerda) e correlação (à direita) entre os dados numéricos e experimentais para uma velocidade de 4000 rpm, T=80°C e EV OFF	65
Figura 4.32 Gráficos de comparação (à esquerda) e correlação (à direita) entre os dados numéricos e experimentais para uma velocidade de 4000 rpm, T=80°C e EV ON	65
Figura 4.33 Síntese dos resultados dos valores de correlação	66
Figura 4.34 Gráfico de correlação entre os dados experimentais tratados em LMS e Matlab: 2200 rpm, T=80°C, EV OFF (à esquerda) e 3000 rpm, T=80°C, EV ON (à direita)	67
Figura 6.1 Janela de importação de add ins	76
Figura 6.2 Janela do Data Block Editor	77
Figura 6.3 Data Set	77
Figura 6.4 Active Formula Set	78
Figura 6.5 Pasta no Workspace com o nome "FuntionCalculatorResults"	78
Figura 6.6 Valor de ruído no segundo harmónico a 2200 rpm, com T=20°C e EV OFF	79
Figura 6.7 GT-Suite vs. LMS (T=20°C, EV OFF, 1º Harmónico)	83
Figura 6.8 GT-Suite vs. LMS (T=20°C, EV ON, 1º Harmónico)	83
Figura 6.9 GT-Suite vs. LMS (T=20°C, EV OFF, 2º Harmónico)	84
Figura 6.10 GT-Suite vs. LMS (T=20°C, EV ON, 2º Harmónico)	84
Figura 6.11 GT-Suite vs. LMS (T=80°C, EV OFF, 1º Harmónico)	84
Figura 6.12 GT-Suite vs. LMS (T=80°C, EV ON, 1º Harmónico)	84
Figura 6.13 GT-Suite vs. LMS (T=80°C, EV OFF, 2º Harmónico)	84
Figura 6.14 GT-Suite vs. LMS (T=80°C, EV ON, 2º Harmónico)	84
Figura 6.15 Gráfico no LMS dos dados experimentais e numéricos: 2200 rpm, EV OFF, T=80°C	85
Figura 6.16 Gráfico no LMS dos dados experimentais e numéricos: 2200 rpm, EV ON, T=80°C	87

Figura 6.17 Gráfico no LMS dos dados experimentais e numéricos: 3000 rpm, EV OFF, T=80°C 89
Figura 6.18 Gráfico no LMS dos dados experimentais e numéricos: 3000 rpm, EV ON, T=80°C 92
Figura 6.19 Gráfico no LMS dos dados experimentais e numéricos: 4000 rpm, EV OFF, T=80°C 94
Figura 6.20 Gráfico no LMS dos dados experimentais e numéricos: 4000 rpm, EV ON, T=80°C 96

1 Introdução

1.1 Enquadramento

Uma bomba é um dispositivo que, independentemente da sua aplicação, tem como função transferir um determinado fluído de um lugar para outro. Por volta do ano 3000 a.C., o império da Mesopotâmia, localizado onde atualmente se encontra o Iraque, Síria e Turquia, criou a primeira bomba hidráulica. Apesar de ser bastante primitiva, cumpria bem a sua função. Esta era composta por uma alavanca de madeira que continha numa das pontas um balde e na outra um contrapeso. Deste modo, o balde era puxado para baixo pela ação da força humana e o contrapeso puxava o balde de volta para cima já cheio de água.

Entre o ano 300 e 100 a.C., Arquimedes inventou a bomba de parafuso (Figura 1.1), que é considerada uma das grandes invenções de todos os tempos. Hoje em dia, esta bomba ainda é usada nos países de terceiro mundo, onde ainda não existe energia elétrica, o que impossibilita o uso de bombas elétricas (1).

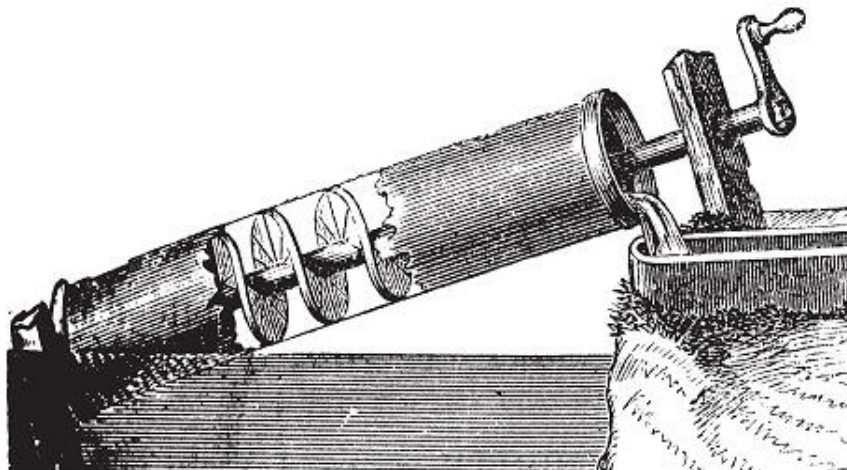


Figura 1.1 Bomba inventada por Arquimedes (1)

Após este período, o desenvolvimento de bombas estagnou, e só 1500 anos mais tarde é que os cientistas da época começaram a pensar sobre o tema da hidráulica. Sendo assim, a partir do século XVI até aos dias de hoje houve uma explosão de ideias, onde foram concebidos vários tipos de bombas hidráulicas. Com a invenção do motor de combustão interna, nasceu também a necessidade de lubrificar os seus componentes. Criaram-se assim bombas de óleo para realizar essa função. Ao longo dos anos, estas bombas têm vindo a ser estudadas e melhoradas quanto à sua performance hidráulica e mecânica. Hoje em dia, com os avanços tecnológicos e com a crescente necessidade de tornar os veículos mais confortáveis e menos ruidosos para o seu utilizador, para além das duas características anteriores, as bombas de óleo também são analisadas na área NVH (Noise Vibration and Harshness). Sendo que este é um dos estudos que se realiza na Renault – Cacia e que irá ser abordado neste trabalho.

1.1.1 Renault

No dia 24 de dezembro de 1898, Louis Renault decidiu conduzir a sua Voiturette na rua Lepic em Paris, equipada com um tipo de transmissão revolucionária. Nesse mesmo dia obteve 12 encomendas para esse mesmo veículo. E assim nasceu o grupo Renault.



Figura 1.2 Primeiro símbolo da Renault sobre a forma de diamante (1924) (2)

A partir daí, a Renault desenvolveu vários carros, como o famoso Renault 4L, do qual foram produzidas mais de 8 milhões de unidades ou o Renault 5 que vendeu mais de 5 milhões de unidades ao longo de 10 anos para todo o mundo. Em 1999 a Renault formou uma aliança com a Nissan e tornou-se o acionista maioritário da Dacia (2). Atualmente, o grupo está presente em 128 países, como é o caso de Portugal, onde opera a fábrica Renault-Cacia. Esta produz maioritariamente caixas de velocidades, bem como componentes para motores como bombas de óleo, cárteres e árvores de equilíbrio.

1.2 Objetivo

O objetivo principal deste trabalho é fazer uma análise da correlação existente entre os dados numéricos e experimentais de NVH que ocorre numa bomba de óleo de cilindrada variável, para mais tarde otimizar e validar o modelo de simulação. O modelo de simulação foi criado pelo gabinete de estudos da Renault-Cacia em cooperação com o suporte do *software* que foi utilizado para o efeito, o GT-Suite. Os dados experimentais foram retirados de ensaios realizados com os meios disponíveis na empresa.

1.3 Organização

Este relatório está dividido em 5 capítulos. No primeiro capítulo é feita uma breve introdução ao tema, onde se fala um pouco da história das bombas de óleo, da Renault e do objetivo do trabalho. No segundo efetua-se uma abordagem ao tema das bombas de óleo, onde é realizada uma caracterização dos aspetos principais das bombas de óleo utilizadas em veículos Renault. No terceiro capítulo, introduz-se o tema NVH (*Noise Vibration and Harshness*), é explicada a origem do ruído nas bombas de óleo e é apresentado o modelo numérico. No quarto capítulo é realizada a análise dos resultados numéricos e experimentais. E por fim no último capítulo é efetuado um apanhado geral do trabalho realizado, onde são expostas as conclusões retiradas do mesmo.

2 Bombas de óleo

2.1 Introdução

Este capítulo encontra-se dividido em vários tópicos. Numa primeira fase apresentam-se os diferentes tipos de bombas de óleo dividindo-as nas diferentes categorias. Após este ponto, é feita uma caracterização do seu princípio de funcionamento, com especial atenção às bombas utilizadas nos veículos Renault. Uma vez que o estudo relativamente ao NVH irá ser realizado em bombas de palhetas, a sua caracterização será mais pormenorizada. De seguida é feita uma análise ao mercado das bombas de óleo, onde é realizado um pequeno resumo dos principais construtores e previsões de mercado. Por fim é executada uma pequena análise ao impacto ambiental que as bombas de óleo podem ter.

As bombas de óleo têm como função assegurar a circulação do óleo a partir do seu reservatório para os componentes do motor (Figura 2.1) que necessitem de lubrificação e/ou refrigeração, funcionando como o coração do motor (3). Como exemplo destes componentes temos os apoios da cambota, os moentes das bielas, cilindros, pistões, segmentos e apoios da árvore de cames. (4)

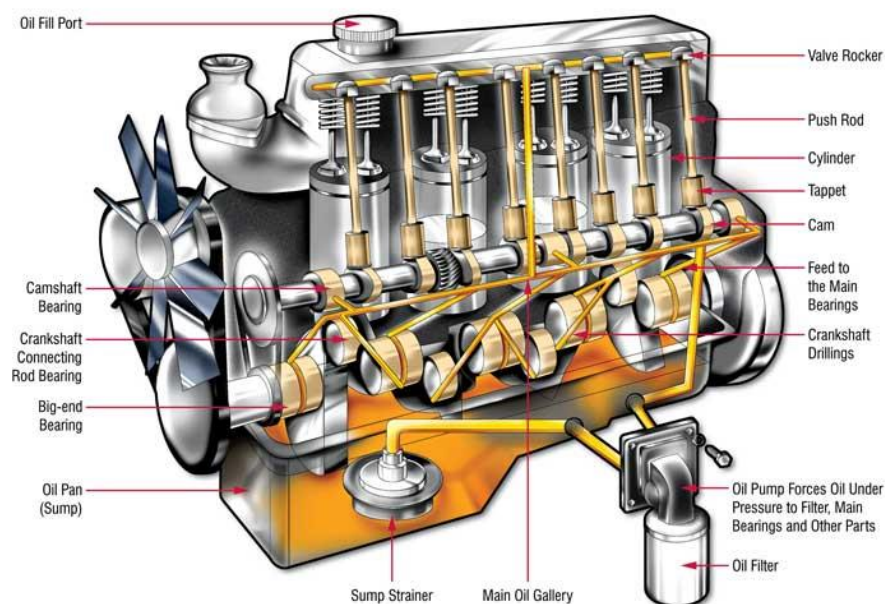


Figura 2.1 Circuito de lubrificação do motor (3).

Para isto, as bombas transformam energia mecânica em energia hidráulica criando uma diferença de pressão entre a entrada e saída da bomba (5). O seu acionamento pode ser conseguido de várias formas:

- Diretamente pela cambota.
- Por uma corrente que liga a cambota ao pinhão de acionamento da bomba, representado na Figura 2.2 (utilizado pelas bombas dos motores Renault).
- Por um mecanismo de engrenagens em cadeia (usado pela Mercedes) (5)



Figura 2.2 Sistema de ativação da bomba por corrente (5)

2.2 Conceitos (tipos de bombas)

Existem diferentes tipos de bombas hidráulicas, as quais podem ser classificadas em duas categorias: bombas dinâmicas e bombas de deslocamento positivo (Figura 2.3).

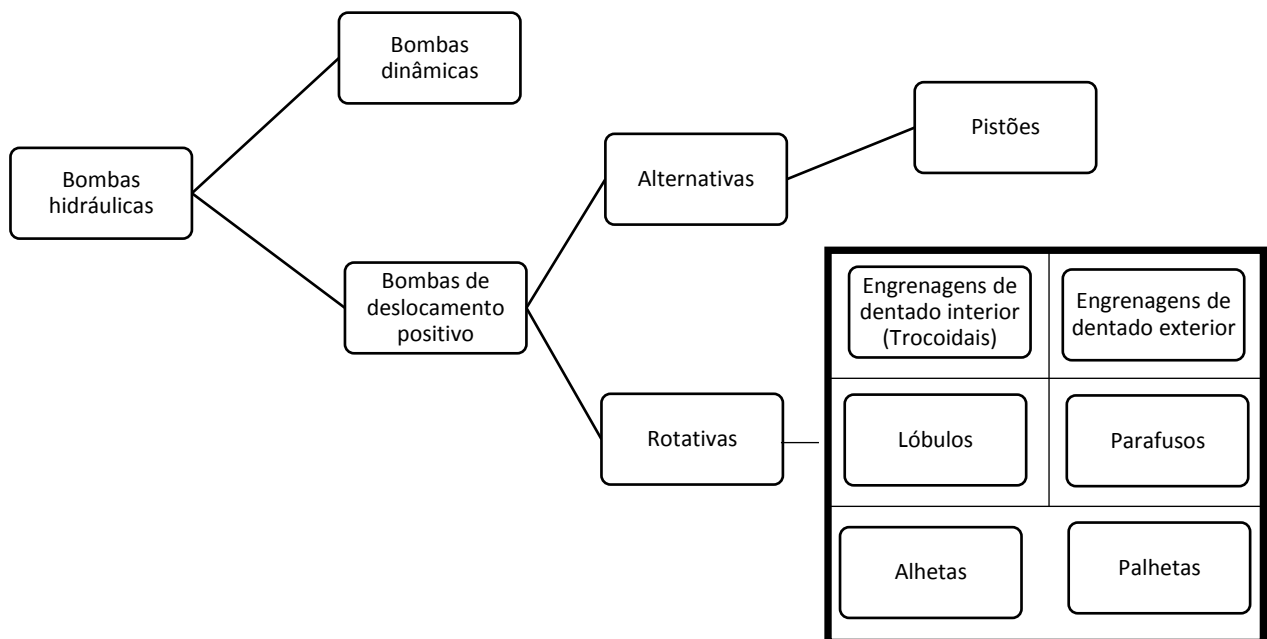


Figura 2.3 Hierarquia das bombas hidráulicas

As bombas dinâmicas usam a força centrífuga de um elemento rotativo para mover o fluido desde a zona de admissão até à zona de descarga, enquanto as de deslocamento positivo usufruem do movimento linear de um ou mais pistões (alternativas) ou da ação espremadora de um ou mais componentes rotativos para deslocar o óleo (rotativas) (6).

Dentro das bombas de deslocamento positivo podemos ainda dividi-las em duas categorias:

- Bombas de cilindrada fixa
- Bombas de cilindrada variável

Das bombas de deslocamento positivo presentes no esquema da Figura 2.3 todas têm uma versão que apresenta cilindrada fixa, no entanto as bombas de pistões, de engrenagens com dentado exterior, trocoidais, de palhetas e de alhetas podem ter uma configuração de cilindrada variável.

2.2.1 Bombas hidráulicas de engrenagens com dentado exterior

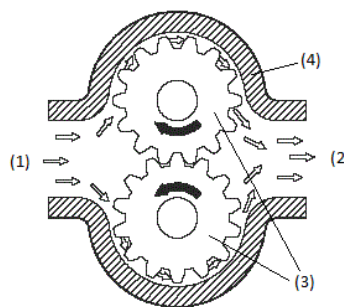


Figura 2.4 Bomba hidráulica de engrenagens com dentado exterior. Adaptado de (7)

Constituição

Uma bomba hidráulica de engrenagens com dentado exterior, representada na Figura 2.4, tem como principais componentes: duas engrenagens de dentado reto (3) (que estão apoiadas em dois veios), uma válvula (*clapet*) para regular a pressão (no caso das bombas fabricadas na Renault está alojada na tampa) e um corpo (caixa) (4) que suporta estes componentes. Para uma melhor compreensão da bomba é necessário ainda dividi-la em duas zonas: a zona de alimentação (1) e zona de descarga (2).

Princípio de Funcionamento

Quanto ao princípio de funcionamento deste tipo de bombas, as duas engrenagens estão em constante rotação, sendo que uma delas é responsável pela transmissão do movimento à outra. Para isso uma das engrenagens encontra-se solidária com o seu veio, ao qual também se encontra ligado o pinhão de acionamento da bomba. A outra engrenagem roda livremente sobre um segundo veio. O espaço libertado na fase “desengrenamento” das mesmas provoca uma sucção do óleo para a zona entre os dentes e o corpo da bomba, que por sua vez é transportado para a zona de descarga (5). O engrenamento dos dentes impede que o óleo não volte para a zona de alimentação.

Regulação de pressão

A regulação de pressão é uma função bastante importante da bomba. Esta permite controlar a pressão de saída do óleo da bomba para não danificar os seus componentes e do motor. Permite também reduzir o consumo de potência bem como diminuir o risco de cavitação.

A cavitação da bomba é o colapso ou implosão das bolhas de vapor que se formam devido à pressão do líquido cair abaixo da pressão de vapor. Estas bolhas ocupam espaço dentro da bomba, afetando o seu bom funcionamento e diminuindo a eficiência do motor (8).

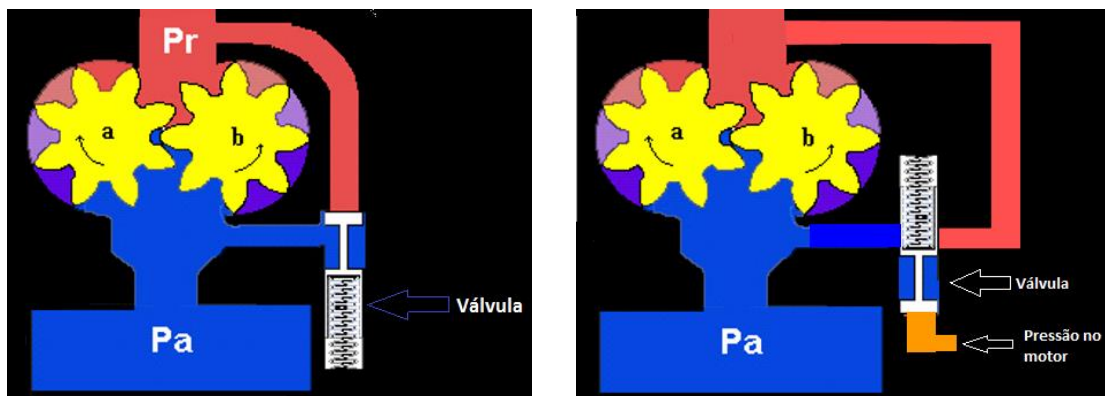


Figura 2.5 Regulação de pressão direta (à esquerda) e regulação de pressão indireta (à direita). Adaptado de (5)

Para regular a pressão este tipo de bombas usa uma válvula de descarga que abre ou fecha, originando uma recirculação do óleo da zona de saída para a zona de entrada. Esta recirculação pode ser feita de forma direta ou indireta. Na primeira, a válvula abre ou fecha tendo em conta a pressão na zona de descarga da bomba (Figura 2.5 à esquerda). Na segunda, a válvula tem em conta a pressão presente no motor (Figura 2.5 à direita).

2.2.2 Bombas hidráulicas de engrenagens com dentado interior sem separador (Trocoídes)

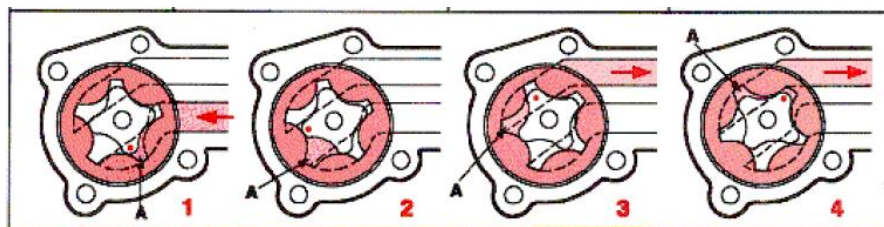


Figura 2.6 Ciclo de funcionamento de uma bomba hidráulica de engrenagens com dentado interior sem separador (Trocoide) (5).

Constituição

Tal como o nome indica este tipo de bomba hidráulica é constituída por uma engrenagem de dentado interior, designada por coroa, e uma de dentado exterior, mais pequena, que vai engrenar na anterior.

Princípio de funcionamento

Pode-se dividir o ciclo de funcionamento da bomba em duas fases: a admissão e a descarga. Durante a admissão gera-se uma depressão pelo aumento do volume entre o rotor interno e a coroa (designado por A na Figura 2.6), fazendo com que o óleo seja aspirado para a zona entre estes dois componentes. À medida que o rotor interno se move, o volume A vai diminuindo, começando a comunicar com a zona de saída do fluido. Quando o volume A é nulo, o óleo é evacuado da bomba sobre pressão (5).

2.2.3 Bombas hidráulicas de palhetas

Existem bombas de palhetas de cilindrada fixa e de cilindrada variável, ou seja, nas primeiras a cilindrada é sempre constante e nas segundas esta poderá ser alterada de acordo com a pressão presente na sua zona de descarga.

Bombas de Palhetas de cilindrada fixa

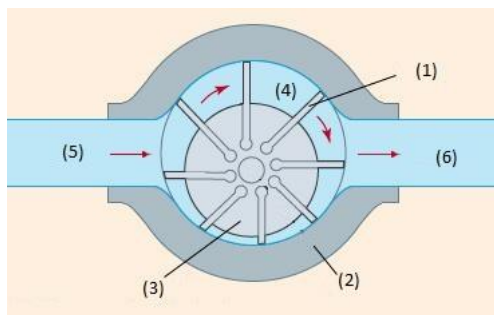


Figura 2.7 Bomba de palhetas de cilindrada fixa. Adaptado de (9).

Constituição

As bombas hidráulicas de palhetas de cilindrada fixa (Figura 2.7) são constituídas por um estator (2) e por um rotor (3). Este contém ranhuras radiais equidistantes onde se encontram palhetas (1). O espaço criado entre duas palhetas, o rotor e o estator designa-se por alvéolo (4) (10). Existe ainda uma zona de admissão (5) e de saída do óleo (6). A dimensão destas zonas é por norma a distância entre duas palhetas consecutivas (5).

Princípio de Funcionamento

Devido ao facto do eixo de rotação do rotor e do estator se encontrarem desviados um do outro (criando-se assim uma excentricidade entre estes) o volume dos alvéolos varia consoante a zona onde se encontra. Esta variação de volume cria uma depressão da zona de alimentação e faz com que o óleo seja chupado para o interior da bomba. Consegue-se assim que o óleo seja transferido desde a zona de admissão até à zona de descarga, onde sai sobre pressão.

O facto de ocorrer uma variação de pressão no interior da bomba provoca esforços radiais assimétricos no rotor interior. Tendo isto em conta, existe uma forma de construção deste tipo de bombas que faz com que estes esforços radiais passem a ser simétricos, originando uma resultante de forças nula (no interior da bomba). Isto acontece pelo facto de estas gozarem de duas zonas de admissão e duas zonas de descarga em faces diametralmente opostas (5). Designam-se por bombas hidráulicas de palhetas equilibradas e estão representadas na Figura 2.8 onde se pode constatar as duas zonas de entrada (D e D') e saída do óleo (C e C').

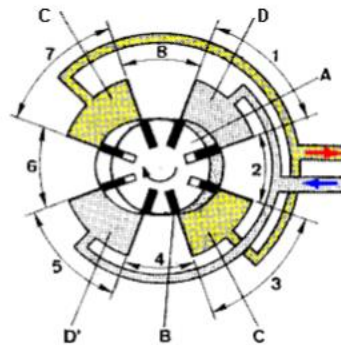


Figura 2.8 Bomba hidráulica de palhetas equilibrada (5)

É importante ainda garantir que as palhetas estejam sempre em contacto com o estator, existindo várias maneiras de o assegurar:

- Através apenas da força centrífuga causada pela rotação do rotor;
- Aplicar no interior do rotor a pressão de descarga;
- Utilizar um anel no centro do rotor (Figura 2.9) (usado pelas bombas de cilindrada variável na Renault)
- Aplicar uma mola entre o rotor e as palhetas (5).



Figura 2.9 Aplicação de um anel no centro do rotor (5)

De seguida apresenta-se a fórmula para o cálculo da cilindrada, que apresenta um resultado mais estável comparativamente à medição do volume 3D efetuada em CATIA (5):

$$Cilindrada = 4 \times b \times n \times e \times r \times \sin\left(\frac{\pi}{n}\right) \times 10^{-3} \quad (2.1)$$

Legenda:

b – altura das palhetas em milímetros

e – excentricidade em centímetros

r – raio do estator em centímetros

n – número de palhetas

Bombas de Palhetas de cilindrada variável

Neste tipo de bombas é possível fazer variar a sua cilindrada através do controlo da excentricidade que existe entre o rotor e o estator. Este controlo pode ser feito usando duas tecnologias distintas: rotação (esquerda da Figura 2.10) ou translação (direita da Figura 2.10). Atualmente a Renault usa nas suas bombas a tecnologia de translação.

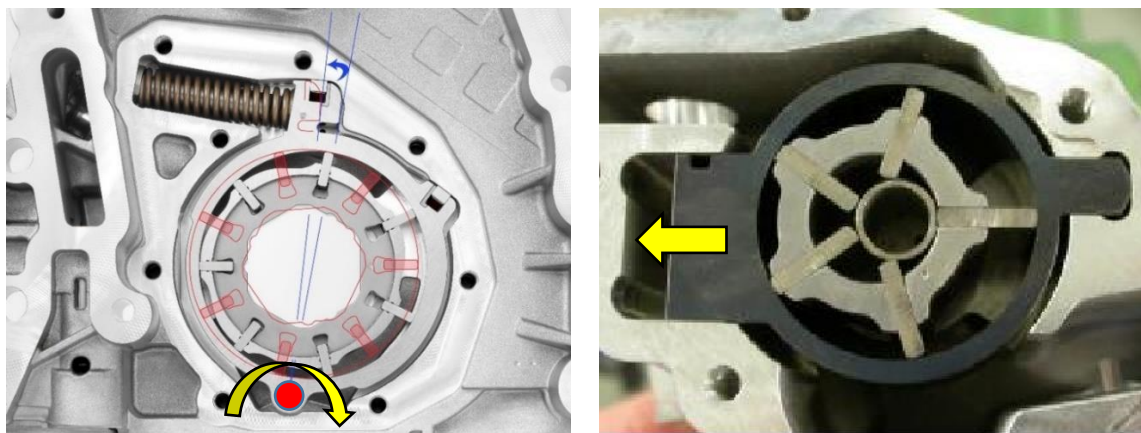


Figura 2.10 Tecnologia de controlo da cilindrada em rotação (à esquerda) e em translação (à direita). Adaptado de (5).

Constituição

Atendendo à Figura 2.11, a sua constituição é semelhante às de cilindrada fixa. Possuem um rotor (3) que contem as palhetas (a verde na figura), um estator (2), um corpo (1), uma zona de admissão (5) e uma zona de descarga (6). Para além disto, usufruem ainda de componentes que variam consoante o tipo de regulação que está a ser usado. No entanto estas são sempre portadoras de: uma mola de controlo (4) que se encontra na câmara de regulação (8), uma câmara piloto (7) e uma válvula (*clapet*).

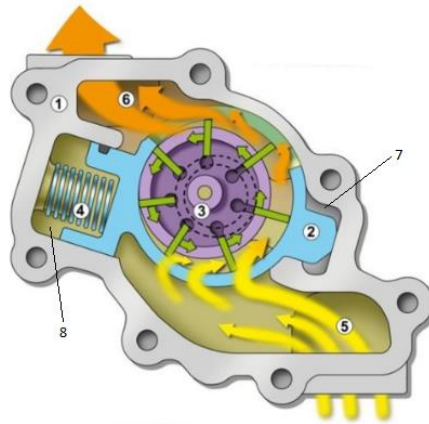


Figura 2.11 Bomba de óleo de palhetas de cilindrada variável. Adaptado de (11)

Princípio de funcionamento

Este tipo de bombas tem então como objetivo ter uma cilindrada variável. Para isso, como já foi referido anteriormente, esta usufrui do facto do estator ser móvel e assim conseguir mudar a excentricidade entre o seu eixo e o eixo do rotor. Quanto maior for a excentricidade maior será a cilindrada da bomba e consequentemente maior será o caudal de fluído debitado. Este comportamento é comprovado pela equação 2.1.

Tipos de regulação

A regulação da cilindrada e da pressão estão diretamente relacionadas entre si, pois a regulação da pressão é realizada por intermédio da regulação da cilindrada (5). Existindo assim vários tipos de tecnologia aplicáveis para isto se suceder.

Regulação mecânica

A regulação mecânica é o tipo mais simples que se pode efetuar. Esta é conseguida pelo deslocamento do estator até que haja um equilíbrio entre as forças exercidas no mesmo (Figura 2.12). Estas forças são causadas pela pressão na câmara piloto, que será igual à pressão de descarga, e por uma mola na câmara de controlo.

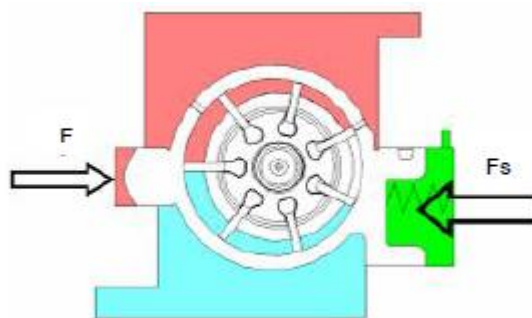


Figura 2.12 Equilíbrio de forças no estator (5).

Apesar de ser bastante simples, tem os seguintes inconvenientes: a pressão de regulação não é constante mas sim crescente com a velocidade de rotação, causando um aumento de consumo, e no caso de cavitação a pressão de descarga pode descer ou subir abruptamente (5).

Regulação hidráulica

A regulação hidráulica consiste em movimentar o estator de forma a haver um equilíbrio entre a pressão na câmara piloto, que tal como na regulação mecânica, é igual à pressão de descarga e à pressão da câmara de controlo, que é pilotada por uma fuga de óleo e um bocal (5).

Tendo em conta a Figura 2.13, a fuga de óleo é controlada pelo fecho/abertura da válvula, aumentando ou diminuindo a pressão na câmara de controlo. Quando a pressão na câmara de controlo diminui (por ação da fuga), a força exercida na parte do estator em contacto com a câmara de controlo é menor do que a força exercida na parte em contacto com a câmara piloto (causada pela pressão de descarga), portanto o estator move-se no sentido de reduzir a cilindrada e a pressão de descarga (ocorre assim uma diminuição da excentricidade entre o rotor e o estator). O mesmo princípio pode ser aplicado no caso da pressão na câmara de controlo aumentar. Neste caso as forças invertem-se e o estator move-se no sentido de aumentar a cilindrada. A válvula abre quando a pressão de descarga atingir um certo nível, descarregando o óleo para o seu reservatório.

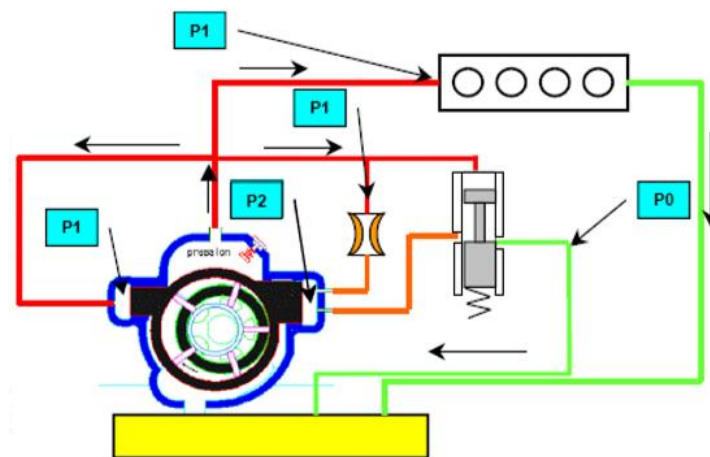


Figura 2.13 Ilustração do princípio de funcionamento da regulação hidráulica (5).

Apesar de ser uma regulação instável, é precisa e rápida. Sendo também mais insensível ao fenómeno de cavitação interna da bomba. (5)

Regulação hidráulica a 2 níveis passiva

Tem por base a regulação hidráulica e é realizada em duas etapas distintas. Tal como na regulação acima descrita, a bomba é portadora de uma fuga na câmara de controlo a qual é controlada por uma válvula, no entanto tem ainda um furo de descarga na mesma zona, representado na Figura 2.14.

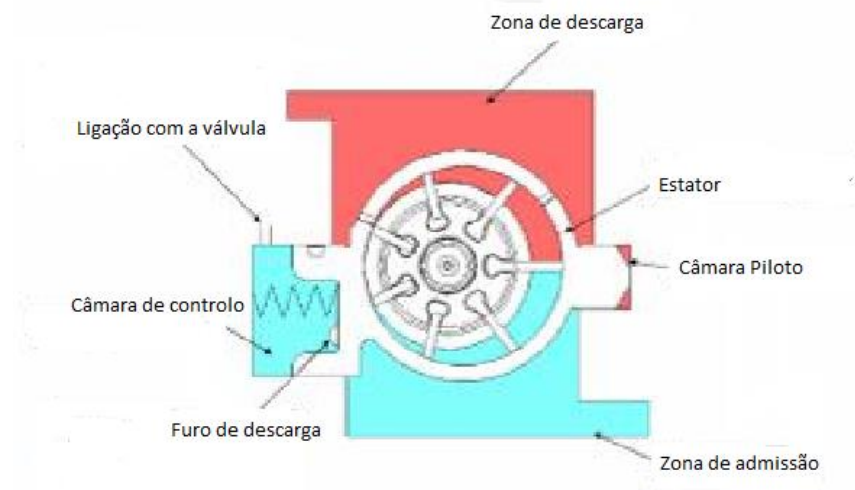


Figura 2.14 Bomba de óleo de palhetas de cilindrada variável com regulação hidráulica a 2 níveis passiva. Adaptado de (5)

Assim numa primeira fase a fuga de óleo dá-se pelo furo de descarga, o que faz mover o estator. A partir do momento em que o estator fecha este furo, a fuga de óleo pelo mesmo, termina, parando também o seu movimento. A bomba chega assim a uma cilindrada denominada por cilindrada virtual. Numa segunda fase a regulação da pressão dá-se pela abertura/fecho da válvula que controla a outra fuga, tal como na regulação hidráulica.

Regulação termo hidráulica

A regulação termo hidráulica também funciona com base na regulação hidráulica e opera em duas etapas diferentes. A câmara de controlo é portadora de dois furos por onde ocorrem fugas de óleo, sendo que uma delas é controlada por um elemento que dilata ou contrai consoante a temperatura a que se encontra, o termóstato. A outra, tal como na regulação hidráulica, é controlada por uma válvula. Numa primeira instância, quando a bomba se encontra a trabalhar a frio, ocorre a descarga de óleo pelo orifício da Figura 2.15. Aqui a regulação hidráulica está desativada. A partir do momento em que o elemento dilata com a temperatura, o orifício fecha, ativando a regulação hidráulica já explicada anteriormente.

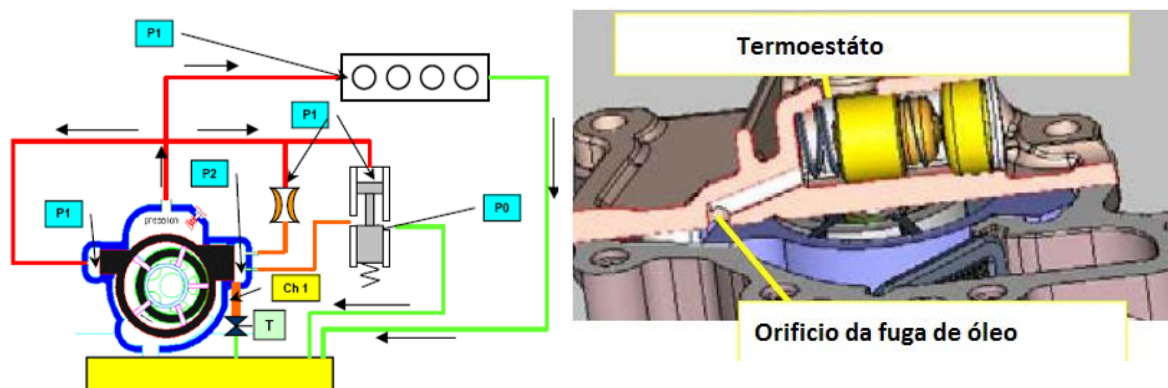


Figura 2.15 Esquema do sistema de regulação termo hidráulica e seus principais responsáveis.
Adaptado de (5)

Regulação hidráulica a 2 níveis controlada por electroválvula

Este tipo de regulação é idêntica à regulação termo hidráulica a 2 dois níveis passiva, no entanto a primeira fuga de óleo é controlada por uma electroválvula (EV), que se encontra a ON ou a OFF (Figura 2.16). Assim esta é a responsável pela passagem à regulação hidráulica, substituindo a função do termóstato na regulação anterior.

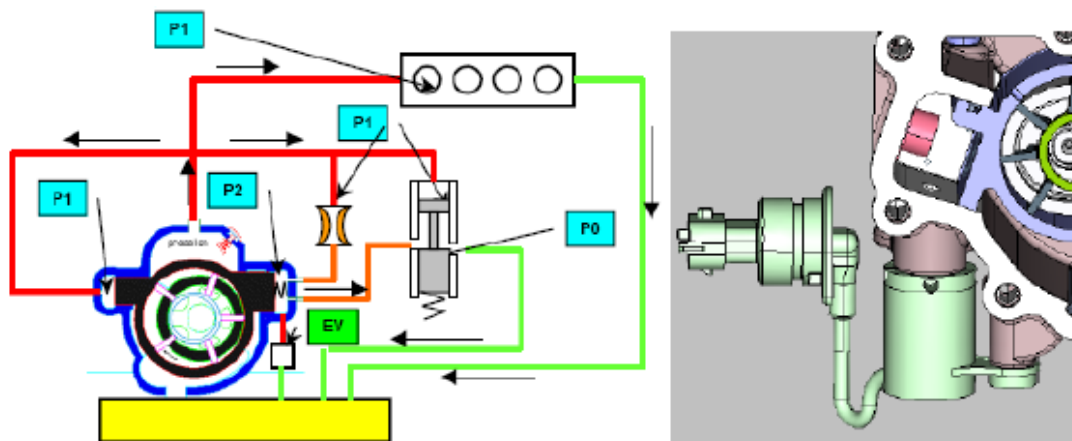


Figura 2.16 Regulação hidráulica a 2 níveis passiva controlada por electroválvula (5).

2.2.4 Bombas produzidas e utilizadas pela Renault

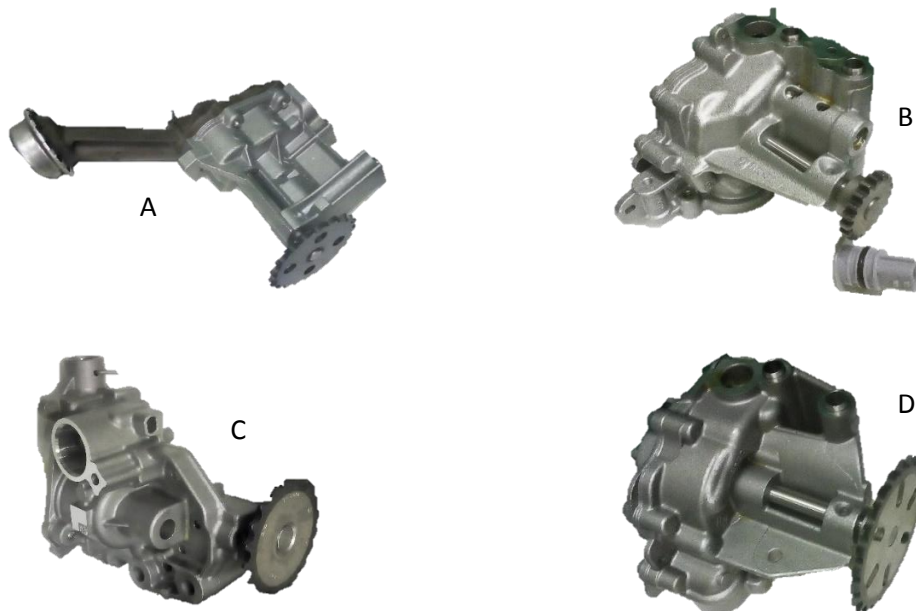


Figura 2.17 Bomba K9 (A), Bomba H4 (B), Bomba M9T (C) e bomba R9M (D)

A Renault utiliza nos seus veículos 3 tipos de bombas: as bombas hidráulicas de engrenagens com dentado exterior, as trocoidais e as bombas de palhetas de caudal variável. Na fábrica Renault-Cacia são fabricadas bombas de dentado exterior, designadas por K, sendo também produzidas 3

tipos de bombas de palhetas de cilindrada variável (Figura 2.17). Estas diferem entre si quanto ao tipo de regulação de pressão e constituintes. As bombas H são caracterizadas por um tipo de regulação hidráulica a 2 níveis controlada por electroválvula, sendo que o estudo de NVH irá ser realizado neste tipo de bombas. As bombas M9T e R9M usam regulação termo hidráulica.

2.3 Mercado

2.3.1 Principais fabricantes de bombas de óleo

As bombas de óleo normalmente são projetadas e produzidas por entidades independentes aos fabricantes de automóveis. Existem construtores que adquirem as bombas diretamente do fornecedor e apenas as montam no veículo e existem outros construtores que adquirem os direitos de produção e produzem as bombas nas suas instalações. Assim alguns dos principais construtores de bombas de óleo são: a Mahle, a SHW, a Hitachi, a Pierburg e a AISIN.

A Mahle é uma empresa criada em 1920 pelos irmãos Mahle. Nessa altura, os pistões dos motores eram feitos de ferro fundido cinzento pesado. Esta empresa começou por contrariar esta tendência e introduziu no mercado pistões de ligas leves, tendo depois começado a desenvolver outros componentes para motores como filtros de óleo e ar (12). Na Figura 2.18 está representada uma bomba de óleo de alhetas fabricada pela Mahle.



Figura 2.18 Bomba de óleo de alhetas fabricada pela Mahle (13)

A SHW é uma companhia fundada em 1921 que começou a sua atividade no setor mineiro, tendo depois alargado para o fabrico de componentes automóveis. No seu segmento de componentes para motores produz bombas para diferentes áreas de aplicação (14). Marcas como a BMW e a Volkswagen usam bombas produzidas por esta empresa (Figura 2.19) nos seus motores.



Figura 2.19 Bomba de óleo tricoide dupla produzida pela SHW (15)

A Hitachi é um conjunto de empresas com sede em Tóquio no Japão. Foi fundada em 1910 com um motor de indução de 5 cavalos como primeiro produto (16). Atualmente, o aglomerado opera em várias áreas, sendo que uma delas é a de equipamentos para automóveis. Os veículos da Infiniti e da Nissan usam bombas fabricadas pela parte da companhia japonesa (Figura 2.20) que atua nesse sector.



Figura 2.20 Bomba de óleo trocoide usada pela Infiniti e fabricada pela Hitachi

Tal como a companhia anterior, a AISIN é uma empresa japonesa especializada na produção de produtos relacionados com o sector automóvel como: travões, chassis, bombas de óleo e outros componentes para motor. A Toyota usa bombas deste fabricante nos seus veículos (Figura 2.21).



Figura 2.21 Bomba de óleo trocoide produzida pela AISIN

Por fim a Pierburg SA tem as suas origens na cidade de Eibar em 1957, ano em que foi fundada a empresa Carbureibar SA. Nos seus primeiros anos em atividade esta firma tinha centrada a sua produção no fabrico de carburadores para o sector automóvel e apenas no ano de 1989 é que a companhia iniciou a sua diversificação nos produtos produzidos, começando pela produção de bombas de vácuo. Nos anos 90, o grupo Pierburg AG comprou por completo a Carbureibar SA e só em 2006 é que esta mudou o seu nome para Pierburg SA (17). Atualmente a Renault produz e usa nos seus veículos bombas de óleo patenteadas por esta companhia, tal como as marcas italianas Alfa Romeo e Ferrari (Figura 2.22).



Figura 2.22 Bomba de óleo do Ferrari 458

2.3.2 Previsões de mercado

Segundo a firma MarketsandMarkets, o mercado das bombas de óleo usadas em automóveis irá atingir os 57.50 mil milhões de dólares em 2021. Isto justifica-se pelo facto de economias Asiáticas como as da China e da Índia estarem a ter um grande desenvolvimento, o que proporciona um crescimento da indústria automóvel nesta região, levando assim a um aumento da produção das bombas de óleo (18).

Devido aos novos regulamentos relativos à diminuição da emissão de poluentes pelos veículos automóveis, existe um aumento da demanda por bombas de óleo mais eficientes. Por este motivo, as bombas de cilindrada variável, são o segmento com maior propensão a crescer nos próximos anos. Este tipo de bombas proporcionam uma redução da carga parasítica na cambota do motor, aumentando a vida do motor e a sua eficiência, reduzindo assim as emissões de gases poluentes.

2.4 Eficiência das bombas de óleo de cilindrada variável e repercussões ambientais

As bombas hidráulicas utilizadas nos veículos automóveis são diretamente ativadas pelo motor. Isto obriga a que o caudal volúmico debitado pela bomba seja maior que o necessário quando o motor se encontra em alta rotação, uma vez que estas bombas são sobredimensionadas de forma a

garantir que o fornecimento de óleo seja suficiente quando o motor se encontra em baixas rotações (19). Ocorre assim uma diminuição na eficiência do motor, tendo também repercussões a nível ambiental.

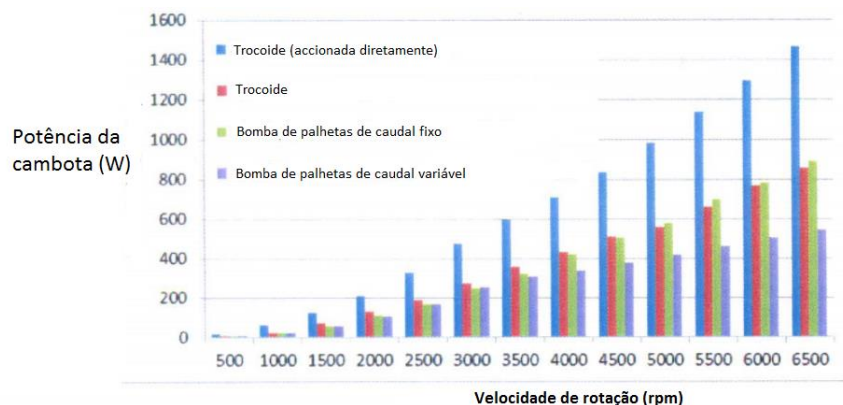


Figura 2.23 Comparação do consumo de energia entre diferentes tipos de bombas. Adaptado de (20)

Como já foi mencionado no capítulo anterior, uma forma de contornar este problema é usar bombas de palhetas de cilindrada variável. Estas bombas adaptam a sua cilindrada consoante as necessidades do motor, conseguindo assim aumentar a sua eficiência e diminuir o consumo de combustível.

Na Figura 2.23 pode-se constatar que o consumo de potência por parte da bomba diminui com a utilização de bombas de caudal variável. Este facto torna-se mais visível à medida que o motor aumenta a sua velocidade de rotação. De acordo com a Renault, as emissões de CO₂ diminuem em 1% com a utilização deste tipo de bombas nos seus motores (21).

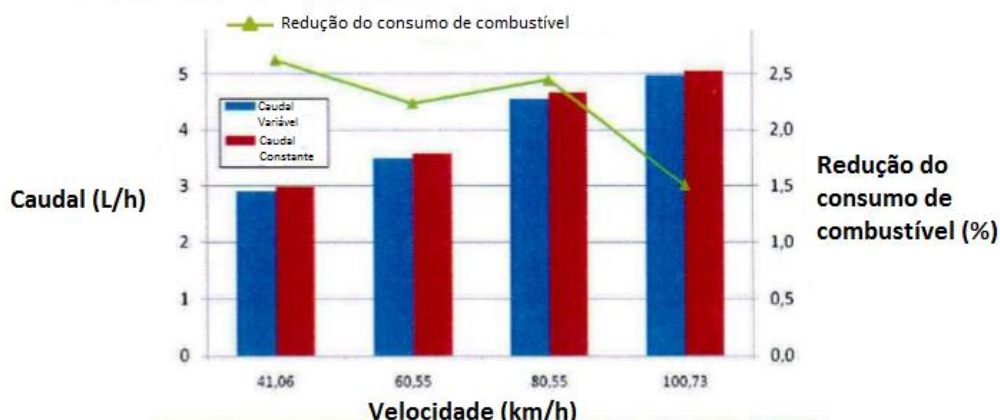


Figura 2.24 Redução do consumo de combustível. Adaptado de (20)

Finalmente, olhando para a linha a verde na Figura 2.24 nota-se que a redução de consumo de combustível varia dos 1.5 aos 2.5 %.

Tendo em conta os números acima apresentados, é possível comprovar as vantagens que as bombas de óleo de cilindrada variável apresentam em termos de eficiência para o motor e de contribuição para uma menor poluição ambiental.

3 Vibrações, Ruído e Aspereza

3.1 Introdução

Cada vez mais as vibrações, o ruído e a aspereza representam um fator importante na indústria automóvel, uma vez que a tendência é sempre melhorar a performance e conforto do veículo a ser projetado e fabricado. As vibrações estão diretamente relacionadas com a qualidade e confiança do produto (22). Quando em excesso podem induzir vibrações às estruturas vizinhas, levando a um funcionamento ineficiente da máquina (23). O ruído está relacionado com o conforto dos utilizadores, sendo também bastante importante em questões ambientais.

Uma vez que a tendência nos últimos anos é produzir veículos mais leves e mais rápidos tendo também em conta um consumo menor de combustível e consequentemente uma melhor performance, o potencial para um aumento das vibrações e ruído também aumentou. Isto conjugado com o facto de os *deadlines* serem cada vez mais apertados, aumentou a dependência no uso de *softwares* de simulação e diminuiu o tempo dedicado ao teste de protótipos. Assim é necessário que os modelos criados em *software* sejam capazes de reproduzir com precisão aquilo que ocorre na realidade. Apesar disto, ainda existe a necessidade de aplicar fundamentos básicos de vibração e ruído no desenvolvimento de um veículo (22).

Neste trabalho foi analisado apenas o ruído proveniente das bombas de óleo H4. Desta forma, deu-se maior relevância à aproximação teórica relativa a essa componente NVH.

3.2 Aproximação teórica à análise de vibrações e ruído

3.2.1 Conceitos de ondas

Ciclo e período

Um ciclo de onda é o trajeto que a onda percorre até repetir esse mesmo trajeto. Tomando como exemplo uma onda sinusoidal (Figura 3.1) de corrente alternativa, esta completa um ciclo quando transita dos 0 volts para uma voltagem positiva, volta aos 0 volts, transita para uma voltagem negativa e retorna aos 0 volts (24). O período da onda, T , é o tempo que esta demora a concluir um ciclo.

Frequência

A frequência, representada pela equação (3.1), é o número de ciclos que ocorrem num segundo. Sendo normalmente representado em Hertz (Hz).

$$f = \frac{1}{T} \text{ (Hz)} \quad (3.1)$$

Amplitude

A amplitude é a medida vertical entre o meio da onda e a sua crista (valor maior) ou o seu vale (valor menor). Esta grandeza está diretamente relacionada com a energia produzida pela componente vibratória (24).

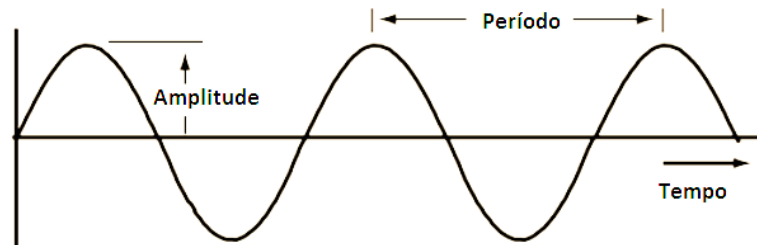


Figura 3.1 Onda sinusoidal. Adaptado de (25)

Ressonância

A ressonância é a tendência que um sistema tem a responder quando uma força oscilatória na sua vizinhança vibra com uma frequência igual ou perto da frequência natural do sistema. A amplitude de vibração do sistema é maior no ponto de ressonância (24).

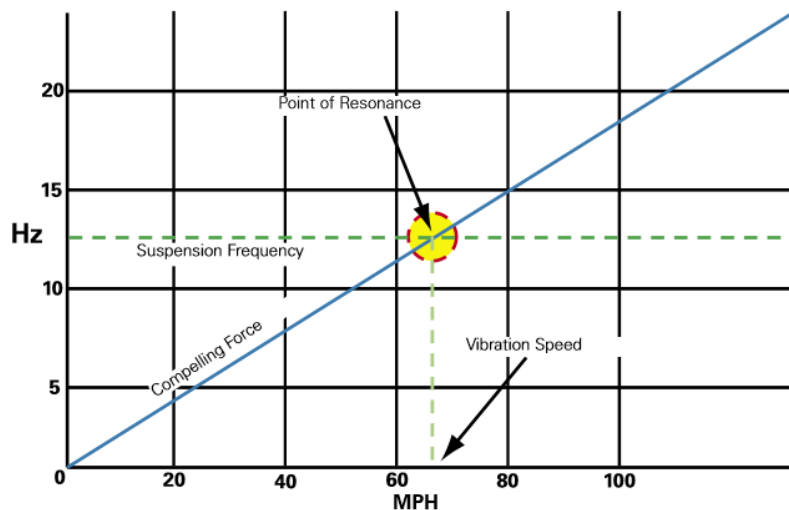


Figura 3.2 Gráfico representativo do ponto de ressonância de uma suspensão (24)

Na Figura 3.2 observa-se que a frequência natural da suspensão encontra-se nos 13 Hz e que a frequência a que vibra uma força oscilatória depende da velocidade do veículo. Quando este atinge uma certa velocidade (cerca de 65 MPH), a frequência de vibração da força fica igual à frequência natural da suspensão, fazendo com que o sistema entre em ressonância.

Frequência fundamental e seus harmónicos

A frequência fundamental é a mais pequena frequência de vibração natural de um objeto. Um harmónico é uma frequência múltipla da frequência fundamental (equação 3.2) (26).

$$\text{Harmónico}(n) = n * \text{Frequência Fundamental}, n = 1, 2, 3, 4 \dots \quad (3.2)$$

3.2.2 Fundamentos das vibrações

Uma vibração é causada por uma perturbação aplicada a um componente ou estrutura flexível.

Existem dois tipos de perturbações:

- Periódicas: têm origem nos componentes internos do veículo, como o motor e os seus componentes. A forma mais simples deste tipo de perturbação é sob forma de uma onda sinusoidal, representada pela equação:

$$x(t) = X \sin(\omega t + \varphi) \quad (3.3)$$

Em que X é a amplitude (deslocamento máximo do equilíbrio), ω é a frequência da excitação, t é o tempo e por fim φ representa a fase, ou seja, o avanço ou atraso entre a resposta do sistema e uma resposta sinusoidal pura.

- Aleatórias: têm origem nas irregularidades do terreno e aquilo que estas provocam nas rodas. Neste caso não é possível expressá-las por funções contínuas no tempo, sendo apenas possíveis representações estatísticas (22).

Os constituintes básicos de um sistema mecânico em vibração são: os componentes relativos à massa/inércia que armazenam energia cinemática, os componentes relativos à rigidez que armazenam energia potencial, os componentes relativos ao amortecimento que dissipam a energia e por fim as fontes de trabalho que fornecem energia ao sistema (23).

Assim, tendo em conta a formulação presente em (22), a equação *standard* para um sistema em vibração pode ser escrita por:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t)\} \quad (3.4)$$

Onde $[M]$, $[C]$, $[K]$ são, respetivamente, as matrizes de massa/inércia, amortecimento e rigidez, $\{\ddot{x}\}$, representa o vetor de aceleração, $\{\dot{x}\}$, o vetor da velocidade, $\{x\}$, o vetor de deslocamento e finalmente, $\{F(t)\}$, o vetor da excitação.

Neste trabalho não se vão analisar as vibrações que ocorrem durante o funcionamento da bomba de óleo. E uma vez que um sistema de apenas um grau de liberdade (Figura 3.3) fornece um conhecimento básico do comportamento vibratório de sistemas mais complexos, torna-se desnecessário caracterizar sistemas com mais que um grau de liberdade.

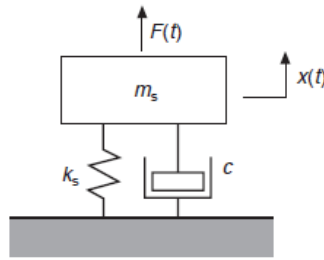


Figura 3.3 Representação de um sistema com um grau de liberdade (22)

Vibrações livres em sistemas com um grau de liberdade

As vibrações livres ocorrem quando o vetor de excitação na equação (3.4) é nulo. Assim a equação do sistema vibratório passa a ser:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (3.5)$$

Dividindo a equação (3.5) pela massa tem-se:

$$\ddot{x} + \frac{c}{m}\dot{x} + \frac{k}{m}x = 0 \quad (3.6)$$

Os dois coeficientes de \dot{x} e x têm influência na solução do sistema. Tendo em conta isto pode-se definir a frequência natural do sistema, w_n , e o ratio de amortecimento, ξ (23). Em que:

$$w_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.7)$$

e,

$$\xi = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (3.8)$$

Quando o sistema é não amortecido a solução pode ser representada por um movimento harmónico simples (equação (3.3)). Quando c não é nulo, o sistema pode ser sob amortecido, em que $\xi < 1$, sobre amortecido, em que $\xi > 1$, e criticamente amortecido, em que $\xi = 1$. Sempre que sob amortecido a solução geral é dada por:

$$x(t) = Xe^{-\xi w_n t} \cos(w_d t - \phi) \quad (3.9)$$

onde X é a amplitude da resposta, ϕ , a fase e w_d , a frequência natural do sistema amortecida:

$$w_d = w_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (3.10)$$

Quando sobre amortecido tem-se como solução geral do sistema a seguinte equação:

$$x(t) = \frac{e^{-\xi w_n t}}{2\sqrt{\xi^2 - 1}} \left\{ \left[\frac{\dot{x}_0}{w_n} + x_0(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}) \right] e^{w_n \sqrt{\xi^2 - 1} t} + \left[-\frac{\dot{x}_0}{w_n} + x_0(-\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}) \right] e^{-w_n \sqrt{\xi^2 - 1} t} \right\} \quad (3.11)$$

Por fim, quando o sistema está criticamente amortecido, a solução pode ser representada por:

$$x(t) = e^{-w_n t} [x_0 + (\dot{x}_0 + w_n x_0)t] \quad (3.12)$$

Vibrações forçadas em sistemas com um grau de liberdade

As vibrações forçadas ocorrem quando se está a exercer trabalho num sistema vibratório (23). Logo a componente $F(t)$ da equação (3.4) é diferente de zero. A solução para a equação geral do movimento é dada por duas componentes: a função complementar e o integral particular. A função complementar é idêntica às soluções dadas pelas equações (3.10), (3.11), (3.12), dependendo do caso de amortecimento. Esta parte da solução tende para zero ao longo do tempo, logo a solução quando o tempo tende para infinito é igual ao integral particular (22).

Quando a força de excitação tem a forma de uma onda sinusoidal, ou seja:

$$F(t) = F_0 \sin(wt) \quad (3.13)$$

onde w é a frequência da fonte de excitação, a resposta dada pelo sistema depois da componente da função complementar desaparecer, tem a forma:

$$x(t) = A(w) \sin[wt - \alpha(w)] \quad (3.14)$$

em que $A(w)$ é a amplitude e $\alpha(w)$ é a fase da resposta, dependendo ambos da frequência de excitação da fonte. A amplitude tem a seguinte equação:

$$A(w) = \frac{F_0}{\sqrt{(k - mw^2)^2 + (cw)^2}} \quad (3.15)$$

Esta pode ser representada através de um fator, D (equação (3.16)), e do ratio entre a frequência da fonte de excitação e a frequência natural do sistema.

$$D = k \frac{A}{F_0} \quad (3.16)$$

Na Figura 3.4 é possível observar que o sistema tem uma amplitude máxima quando o rácio das frequências está próximo de 1. Isto ocorre pelo facto de o sistema entrar em ressonância, tal como já foi explicado no subcapítulo anterior. É possível ainda concluir que a amplitude é influenciada

pelo nível de amortecimento, e que quando a frequência de excitação é bastante diferente da frequência natural, o nível de amortecimento deixa de ter influência na amplitude da resposta (22).

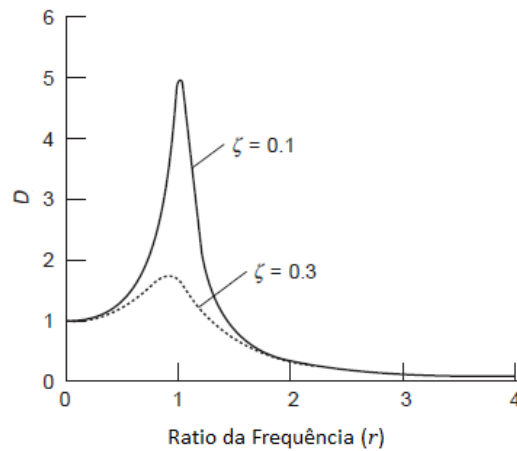


Figura 3.4 Amplitude da resposta de um sistema de um grau de liberdade com vibração forçada.
Adaptado de (22)

3.2.3 Pressão sonora e ruído

O som é transmitido através de um meio elástico, que no contexto automóvel é o ar. Isto ocorre quando uma estrutura vibrante transmite a sua vibração às moléculas de ar vizinhas, provocando flutuações de pressão na atmosfera que podem ser representadas sob a forma de uma onda sinusoidal. Estas variações de pressão são detetadas pelo ouvido humano e são responsáveis pelo som que ouvimos (22). Quanto maior for a flutuação de pressão maior é a intensidade sonora.

O nível de pressão sonora (SPL) tem como unidades SI, o Pascal (Pa). No entanto, este é normalmente medido em decibéis (dB), uma unidade logarítmica que expressa o rácio entre dois valores.

$$SPL = 20 * \log_{10} \left(\frac{p}{p_{ref}} \right), dB \quad (3.17)$$

Na Tabela 3.1 é possível comparar os valores entre pressão sonora em Pa e em dB. Como se pode verificar a escala em decibéis é bastante mais conveniente uma vez que os valores apenas variam entre 10 e 150, enquanto na outra variam entre valores de ordem bastante pequenas até valores na ordem das centenas. É necessário ainda notar que o valor da pressão de referência, nesta tabela, tem o valor 20 μPa, que é o valor mínimo de pressão que consegue ser captado pelo ouvido humano.

Tabela 3.1 Comparação entre os valores de pressão sonora em Pa e dB. Adaptado de [27]

Fonte	Pressão sonora (Pa)	Pressão sonora (dB)
Farfalar das folhas	0.0000632	10
Conversação normal	0.01	54
Televisão caseira	0.02	60
Ruido do carro ouvido na rua	0.1	74
Motor de um avião a jato ouvido a 100 metros	100	134
Banda de rock	200	140
Motor de um avião a jato ouvido a 1 metro	630	150

Domínio do Tempo, domínio da Frequência e Transformadas de Fourier

Como já foi referido acima e tal como no caso das vibrações, uma onda sonora também pode ser representada por uma senoide, representada pela equação (3.3). Neste caso, ela indica a mudança de pressão no ar em função do tempo. O som provocado por apenas uma onda sinusoidal tem um tom puro. Geralmente, as sonoridades que são captadas pelo ouvido são uma combinação de vários tons puros e consequentemente são representadas pela soma de várias ondas sinusoidais.

$$x(t) = \sin(2 * \pi * 350 * t) + \sin(2 * \pi * 440 * t) \quad (3.18)$$

Como exemplo disto, na equação (3.18) a onda é constituída por dois sons puros com frequência de 350 Hz e 440 Hz em que a sua junção resulta noutro som representado por uma onda diferente (Figura 3.5).

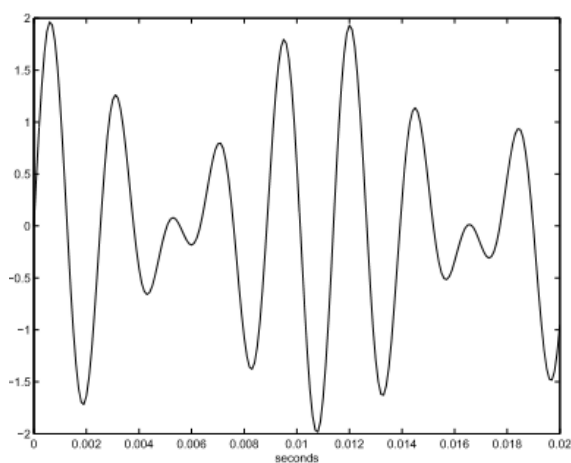


Figura 3.5 Combinação de duas ondas sinusoidais puras com frequência de 350 Hz e 440 Hz (27)

Assim todos os sinais de pressão sonora no domínio do tempo podem ser contruídos pela combinação de sinusoides numa só onda e reversivelmente decompostos em várias ondas sinusoidais, de onde é possível retirar as várias frequências e amplitudes. Logo pode-se formar um gráfico da amplitude em função da frequência. É então possível haver uma mudança entre o domínio do tempo e da frequência, que é conseguida através do uso das transformadas de Fourier (27).

Ruído em bombas de óleo

Durante o funcionamento das bombas, ocorrem flutuações de pressão na zona de descarga devido ao bombeamento do óleo. Ou seja, têm origem na passagem das câmaras da bomba da zona de baixa pressão (zona de admissão) para a zona de alta pressão (zona de descarga). Estas flutuações são responsáveis pelo ruído com origem no fluido (*fluidborne noise*), provocando também vibrações estruturais.

O ruído provocado pelo fluido não pode ser desprezado, pois ele é um dos grandes responsáveis pelo ruído audível nas bombas de óleo. Portanto, torna-se importante estudar numericamente e experimentalmente este tipo de ruído, com intuito de o reduzir e melhorar a performance acústica das bombas de óleo (28). Deste modo, o *fluidborne noise* é objeto de estudo na Renault-Cacia. Este foi simulado utilizando o modelo numérico apresentado mais à frente e posteriormente comparado com o estudo experimental realizado, com o objetivo de validar o modelo.

Tendo em conta o princípio de funcionamento da bomba, deduz-se que a frequência das pulsações de pressão pode ser expressa pela seguinte fórmula:

$$f = z \frac{n}{60} i \quad (3.19)$$

onde, z representa o número de palhetas da bomba, n a velocidade de rotação da bomba e i o número do harmónico. A partir desta fórmula é possível comparar as frequências dos harmónicos dados pelos resultados numéricos e experimentais com as dos harmónicos teóricos. Sendo este um dos critérios para testar a validade do modelo numérico.

Tipos de ruído que surgem nos automóveis

A classificação do som em vários tipos de ruído ajuda na identificação da fonte do problema e consequentemente na sua reparação. Assim, pode-se descrever o ruído usando os seguintes termos:

- “Zumbido”
- “Batida”
- Ruído da estrada
- “Guincho” dos travões

O “Zumbido” é a sensação que os condutores ou passageiros sentem quando entram num túnel a alta velocidade ou quando se passa de uma baixa para uma alta altitude. Este tipo de ruído

normalmente ocorre quando o veículo acelera e alcança uma certa velocidade, havendo um aumento anormal de ruído em torno dessa velocidade. É também habitualmente produzido por mais que um componente. Pode ter várias causas como por exemplo as vibrações do motor e seus componentes serem transmitidas para os painéis do corpo do automóvel, fazendo com que estes entrem em ressonância ou quando as ligações da suspensão também entram em ressonância.

A “batida” é um tipo de ruído que aparece quando existem duas fontes diferentes de som com frequências semelhantes. Este facto faz com que os dois sons sejam indistinguíveis e pareçam apenas um (“a Batida”). Como exemplo de combinações tem-se: as vibrações do motor e do compressor do ar-condicionado, a não uniformidade dos pneus, as vibrações da bomba hidráulica da direção assistida e do motor.

O ruído de estrada acontece quando esta ou os pneus apresentam uma maior rugosidade.

O “guincho” dos travões produz uma onda de alta frequência que ocorre quando existe fricção entre os componentes do sistema de travagem. Como causa do ruído podemos ter a não uniformidade da espessura dos discos ou tambores, humidade no revestimento do travão ou deterioração excessiva (24).

Região audível do som nos humanos

O ouvido humano (Figura 3.6) é constituído por uma zona exterior, intermédia e interior. O ouvido exterior contém o canal, o ouvido intermédio é constituído pelos ossículos (o martelo, a bigorna e o estribo) e pelo tímpano, por fim o ouvido interno contém a cóclea. Esta é uma membrana helicoidal à qual estão ligados pelos com diferentes espessuras, responsáveis por converter os diferentes estímulos sonoros (sob a forma de onda) em impulsos nervosos, que por sua vez irão ser transmitidos ao cérebro (22).

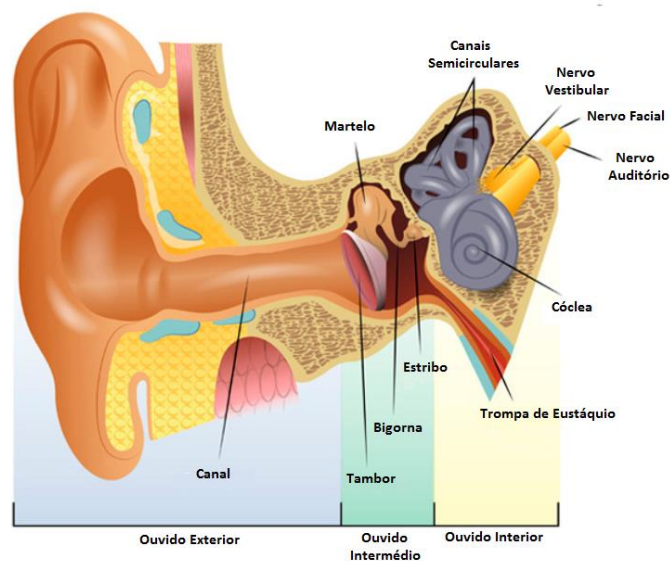


Figura 3.6 Ouvido humano. Adaptado de (29)

Segundo a Figura 3.7, a região audível para uma pessoa saudável encontra-se entre os 20 Hz e os 20 kHz, sendo que é necessário um certo nível de pressão sonora (dB) para estimular o ouvido. De notar ainda que uma estimulação excessiva pode levar a surdez temporária ou permanente. Este facto fez com que se criassem regulações dentro das unidades fabris de forma a proteger os trabalhadores (22).

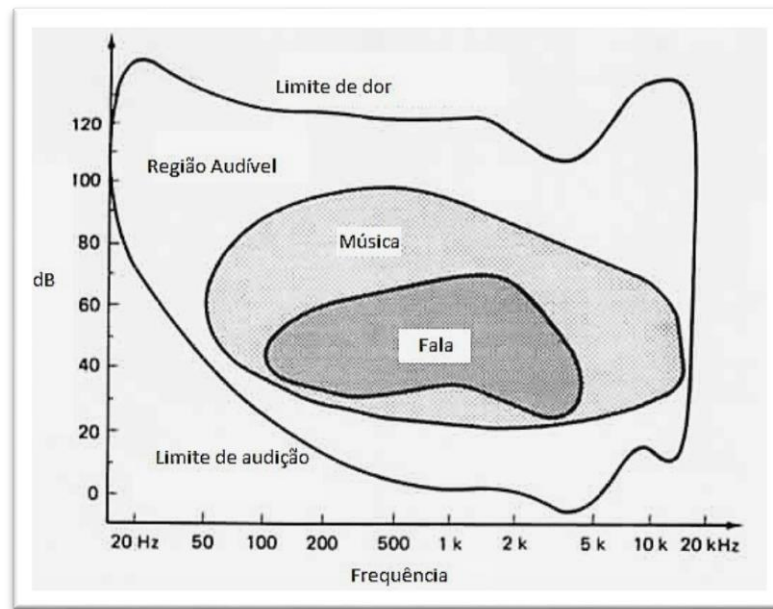


Figura 3.7 Região audível do som. Adaptado de (30)

3.3 Ferramentas Numéricas e Experimentais usadas nos estudos de NVH

Este subcapítulo encontra-se dividido em dois pontos essenciais. No primeiro é feita uma descrição geral das ferramentas numéricas que podem ser utilizadas para os estudos de NVH, dando-se depois um maior interesse ao que é utilizado pela Renault e uma breve explicação de como foi criado o modelo, bem como a sua lógica de funcionamento. No segundo ponto são caracterizadas as ferramentas experimentais normalmente usadas nas medições de vibrações e de ruído.

3.3.1 Ferramentas Numéricas

MSC Software/Actran Acoustics

O Actran Acoustics é um módulo do Actran usado para resolver, perceber e melhorar problemas de acústica. Este foi desenvolvido pela empresa MSC Software.

Tem por base o método dos elementos finitos e algumas das suas capacidades são: analisar o campo sonoro em cavidades, analisar a radiação sonora e analisar a propagação do som em tubos, aeronaves e automóveis... (31)

Assim alguns exemplos de aplicação deste *software* são:

- Simular a radiação acústica provocado por estruturas vibratórias como o *powertrain* (Figura 3.8);
- Simular o ruído da admissão e exaustão;
- Simular a absorção sonora dentro dos compartimentos dos passageiros em carros, comboios e aeronaves;
- Analisar a acústica em dispositivos sonoros como telefones, auxiliares de audição e instrumentos musicais.

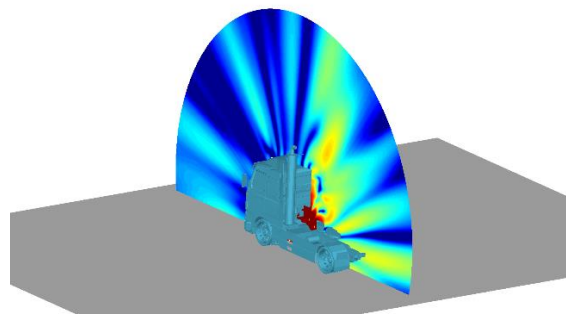


Figura 3.8 Radiação acústica de um motor de um camião simulada em Actran (31)

PULSE

Desenvolvido pela companhia Bruel & Kjaer, o PULSE permite uma experiência interativa do ruído, vibração e aspereza do automóvel, ou seja, possibilita que o utilizador sinta na realidade o ruído e vibração produzidos pelo veículo a ser simulado. Relativamente ao ruído, este é reproduzido através de *headphones* ou colunas, enquanto as vibrações são transmitidas por um volante e pedais que estão emparelhados com o *software* (Figura 3.9). Além da componente interativa este *software* possibilita ainda uma análise gráfica de NVH (32).

Aplicações:

- Prototipagem virtual de NVH em qualquer etapa do projeto de um automóvel;
- Comparação com a concorrência;
- Ajudar a perceber o impacto de mudanças no projeto de um veículo nas suas características de NVH;



Figura 3.9 Interatividade entre o *software* PULSE e o utilizador (32)

Siemens/LMS Imagine.Lab Amesim

O LMS Imagine.Lab Amesim é um *software* de simulação desenvolvido pela Siemens que permite modelar, simular e analisar sistemas de vários domínios. Para isto possui 38 livrarias com mais de 4500 componentes dos principais domínios físicos (fluidos, termodinâmica, eletrónica, mecânica). Assim combinando estes componentes é possível simular vários sistemas em diversas áreas de aplicação (33).

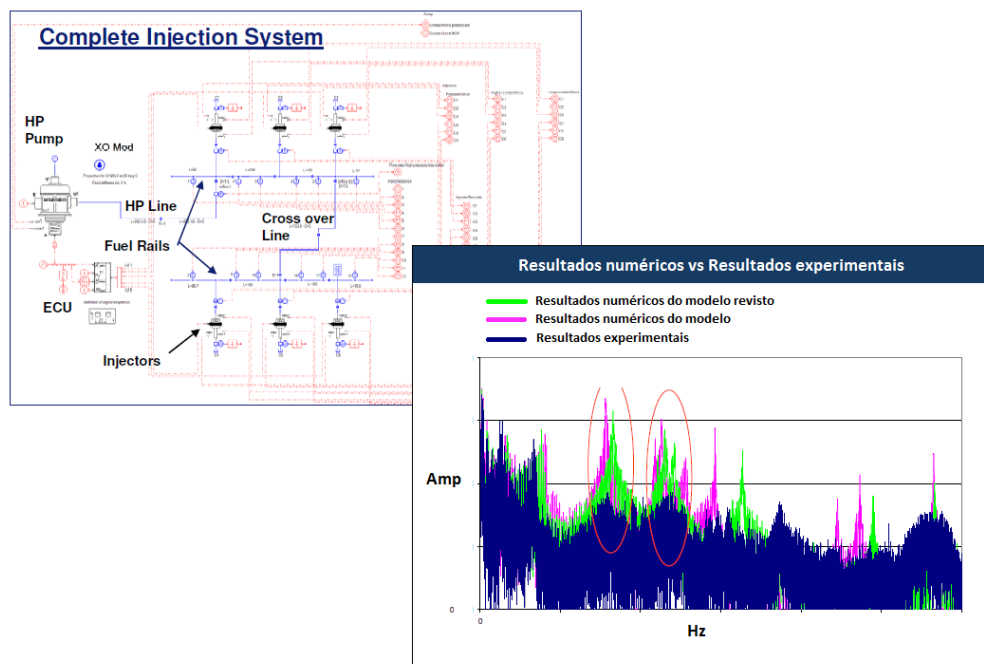


Figura 3.10 Modelação da rede hidráulica do injetor de combustível em LMS Imagine.LAB Amesim e comparação dos resultados numéricos com os experimentais. Adaptado de (34)

Segundo (34), é possível usar este *software* para modelar a rede hidráulica do injetor de combustível de um motor e obter a amplitude da pulsação de pressão. Na Figura 3.10 está

representada a comparação entre os dados numéricos e experimentais da amplitude da pulsação de pressão num injetor de combustível, bem como a modelação do sistema no *software* em causa.

Siemens/NX Nastran

Tal como o *software* anterior o NX Nastran foi desenvolvido pela Siemens. Baseia-se no método de elementos finitos para resolver problemas de análise de tensões, vibrações, falha estrutural, transferência de calor e acústica, tendo uma grande variedade de aplicações.

Este *software* tem uma grande capacidade de computação o que é vantajoso na análise de vibrações e ruído, pois para se realizar um estudo de NVH preciso é necessária a utilização de modelos extensos (35).

3.3.2 Ferramenta Numérica utilizada na Renault e breve explicação do seu princípio de funcionamento

Gamma Technologies/GT-Suite

O GT-Suite é um *software* desenvolvido pela Gamma Technologies e é reconhecido com sendo o líder mundial na modelação de sistemas a 0/1 dimensão. O seu princípio de funcionamento é então parecido com o LMS Imagine.Lab Amesim. Este fornece uma grande quantidade de livrarias no domínio dos fluidos, térmico, mecânico, elétrico, magnético, da química e dos controlos, sendo assim possível modelar sistemas de engenharia, incluindo veículos, motores, transmissões, sistemas hidráulicos e de lubrificação, etc... (36).

GT-SUITE is an ideal tool for modelling pumps and compressors whether it be for use in system level analysis or modelling detail flow behaviour [....] This machinery can be studied in detail to predict performance, flow, and pressure pulsations, NVH issues, friction, and support bearing performance. Many types of pumps and compressors can be modelled including positive and variable displacement, gerotor, vane, external gear, piston, swashplate.... (37)



Figura 3.11 Bomba de óleo H4

Posto isto, o GT-Suite é utilizado pela Renault para simular o comportamento relativo ao ruído nas suas bombas de óleo. Este *software* possui um pré-processador que permite importar um modelo CAD da bomba e transformá-lo num modelo de 1 dimensão. Nesse modelo (Figura 3.12 e Figura 3.13), é simulado o circuito do óleo desde a fase de admissão até à descarga tendo em conta a geometria dos vários compartimentos da bomba.

Como já foi referido no capítulo 2, a bomba de óleo H4 (Figura 3.11) é constituída por uma zona de entrada de óleo (representada a azul claro) que corresponde à zona 1 do simulador, por uma zona de saída (representada a vermelho) que corresponde à zona 2 do simulador, por 7 palhetas (representadas a azul escuro) e 7 câmaras em rotação que correspondem à zona 3. A zona 4 e 5 do simulador correspondem, respetivamente, à válvula responsável pela parte da regulação hidráulica, que também já foi explicada no ponto 2.2.3, e à electroválvula da bomba.

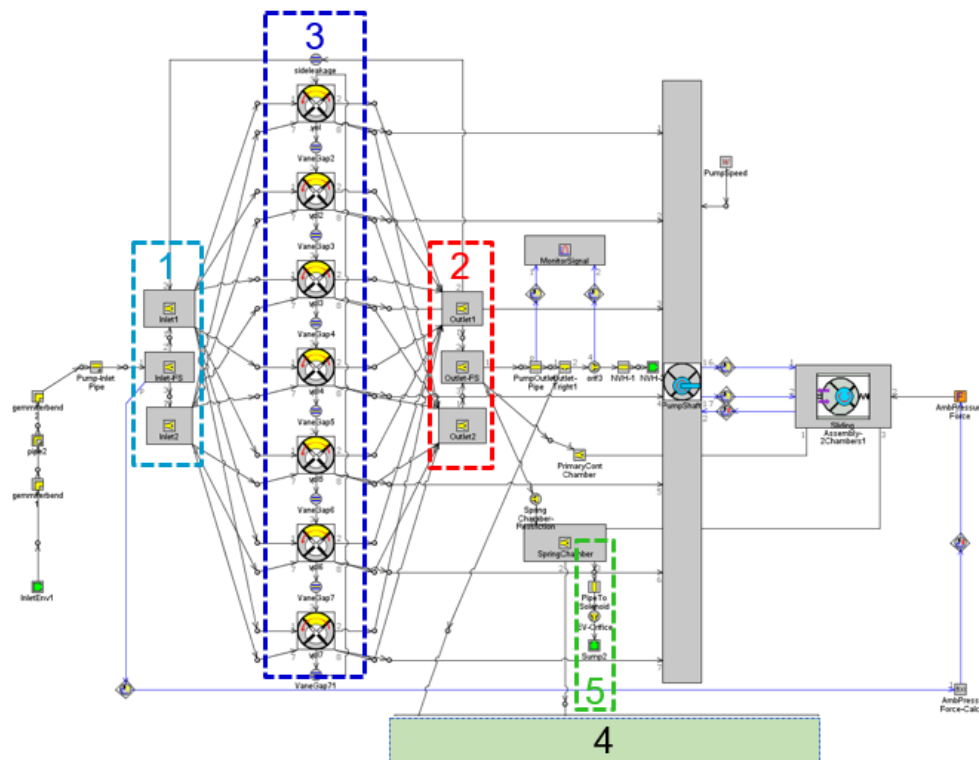


Figura 3.12 Simulador das pulsações de pressão da bomba H4

Como output da simulação tem-se o sinal das pulsações de pressão à saída da bomba no domínio do tempo, que serão responsáveis pelo ruído. Mais uma vez, usando as transformadas de Fourier é possível retirar a amplitude das pulsações em função da frequência e através da equação 3.17, transformar a amplitude do sinal em decibéis.

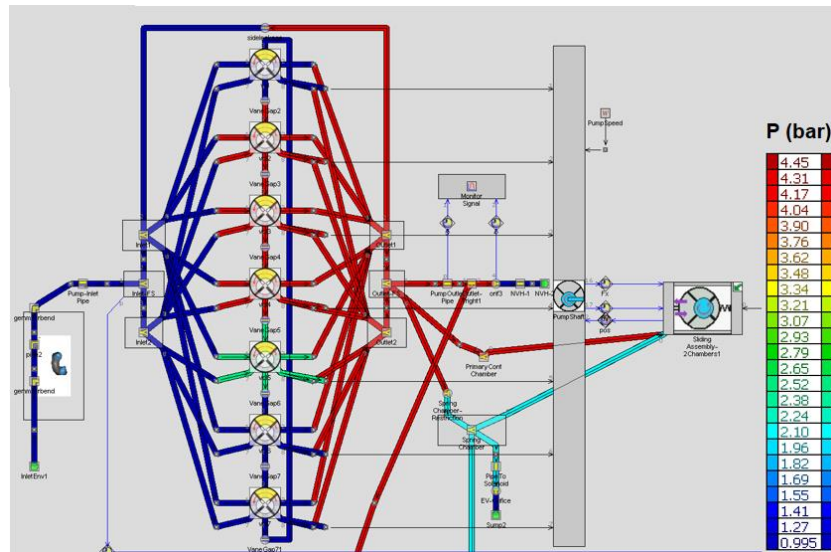


Figura 3.13 Pressão simulada da bomba ao longo do circuito do óleo

3.3.3 Ferramentas Experimentais

Medição de vibrações

As vibrações de um corpo podem ser medidas com vários tipos de sensores. Os acelerómetros piezoelétricos são os sensores mais comuns usados nos estudos de vibrações dos sistemas mecânicos, uma vez que exibem melhores características do que outros transdutores usados para o efeito.

Acelerómetros piezoelétricos

Os acelerómetros piezoelétricos (Figura 3.14) medem a aceleração dinâmica de um sistema físico e apresentam uma grande gama de frequências e de alcance nos parâmetros dinâmicos, com boa linearidade ao longo da gama (38).

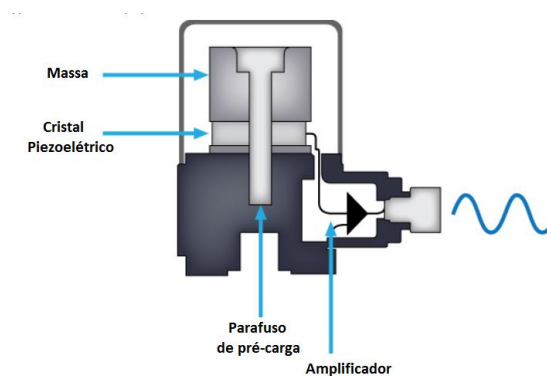


Figura 3.14 Acelerómetro piezoelétrico. Adaptado de (38)

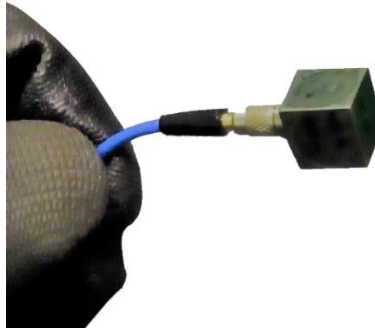


Figura 3.15 Acelerómetro da PCB Piezotronics de 3 eixos usado na Renault

Estes usam o efeito piezoelétrico, que ocorre quando corrente elétrica é gerada através de certos tipos de cristais quando estes estão sujeitos a tensões. Assim o princípio de funcionamento deste tipo de transdutores passa pelo facto de a aceleração do sistema (a ser testado) ser transmitida a uma massa que se encontra dentro do acelerómetro gerando uma força no cristal piezoelétrico. Por sua vez, este gera uma carga elétrica proporcional à força e à aceleração. Os acelerómetros piezoelétricos são ainda portadores de um amplificador que tem como função amplificar a carga elétrica gerada, diminuir a impedância de saída por forma a ser compatível com os dispositivos de leitura e minimizar a sua sensibilidade a fontes externas de ruído (38).

Na Renault são usados acelerómetros da PCB Piezotronics (Figura 3.15) de eixo único (apenas mede a aceleração numa direção) ou de 3 eixos (mede as acelerações em 3 direções).

Medição de ruído

É possível medir ruído através do uso de microfones. Estes convertem as pulsações de pressão que captam na atmosfera, em sinais elétricos. Os mais comuns são os microfones condensadores e os microfones piezoelétricos.

Microfones condensadores

Este tipo de microfones incorporam um diafragma e um disco de metal formando um condensador (Figura 3.16). É aplicada uma diferença de potencial DC a estes dois componentes através de uma alta resistência para manter as cargas elétricas. Quando uma onda sonora excita o diafragma, a capacitância entre do condensador é alterada, gerando uma corrente AC na saída proporcional à pressão sonora.

Os microfones condensadores podem ser exteriormente polarizados quando a carga do condensador é gerada por uma voltagem de polarização exterior, ou pré polarizados quando a diferença de potencial no condensador é garantida pelas propriedades do seu material (39).



Figura 3.16 Microfone Condensador. Adaptado de (39)

Microfones piezoelétricos

Os microfones piezoelétricos usam uma estrutura de cristal para produzir diferença de potencial no disco de metal. Estes têm uma grande durabilidade e são capazes de medir grandes amplitudes de pressão. São também capazes de captar sons de materiais sólidos (39).

Sondas de pressão

Como já foi explicado anteriormente, na Renault-Cacia a análise de ruído nas bombas de óleo é feita através das flutuações de pressão que ocorrem na zona de descarga. Assim, as flutuações são medidas diretamente por uma sonda de pressão na zona de saída do óleo da bomba.

As sondas de pressão possuem um componente de área constante que é sensível à força aplicada pela pressão do fluido. Através de um método de transdução, as deflexões, deformações ou tensões presentes no componente são transformadas num sinal elétrico proporcional à pressão do fluido.

3.4 Levantamento de estudos realizados sobre tema NVH

3.4.1 Estudos NVH em bombas de óleo

Fluid-sound coupling simulation and experimental validation for noise characteristics of a variable displacement oil pump (40)

Neste trabalho é efetuada uma análise entre os resultados da simulação numérica e experimental, relativas aos níveis de ruído de uma bomba de engrenagens de dentado exterior de caudal variável. Tem como autores: C.Tang, Y.S Wang, J.H. Gao e H. Guo da Universidade de Shanghai.

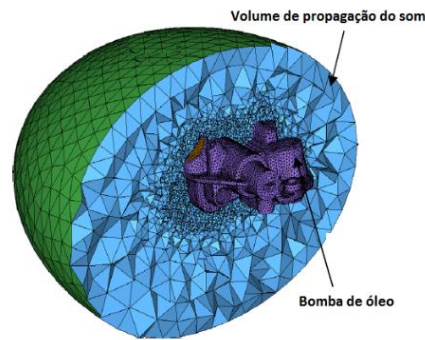


Figura 3.17 Malha da bomba, seus componentes e ar envolvente. Adaptado de (40)

Foi concebido um modelo de simulação em Actran com base na combinação do método dos elementos finitos com a dinâmica dos fluidos computacional. Criou-se uma primeira malha para a bomba, seus componentes e o ar envolvente (Figura 3.17) e uma segunda malha para a área pela qual o fluido passa.

A Figura 3.18 mostra os resultados numéricos para as seguintes condições: 1000 rpm a 1.8 bar, 3000 rpm a 1.8 bar e 5000 rpm a 3.3 bar.

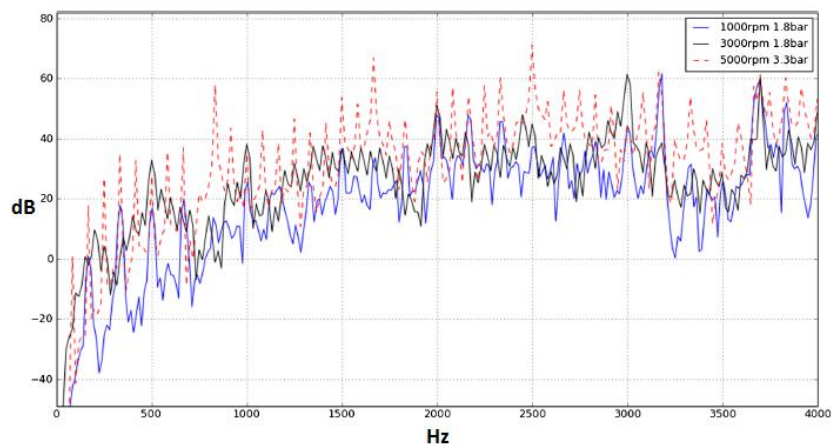


Figura 3.18 Resultados numéricos de ruído (dB)

No trabalho experimental foram utilizados os seguintes materiais:

- Bomba de engrenagens de dentado exterior de caudal variável;
- Microfone para medir o nível de pressão do som;
- Banco de ensaios para bomba de óleo;

Condições experimentais:

- O óleo encontra-se a 120 °C;
- O microfone foi colocado a uma distância de 80 cm da bomba;
- A velocidade de rotação aumenta gradualmente dos 1000 aos 5000 rpm;

- A cada aumento de 1000 rpm e após a estabilização do banco de ensaios é retirada informação durante 10 segundos do nível de ruído usando o *software* LMS Test. Lab.

Comparação dos resultados experimentais com os numéricos:

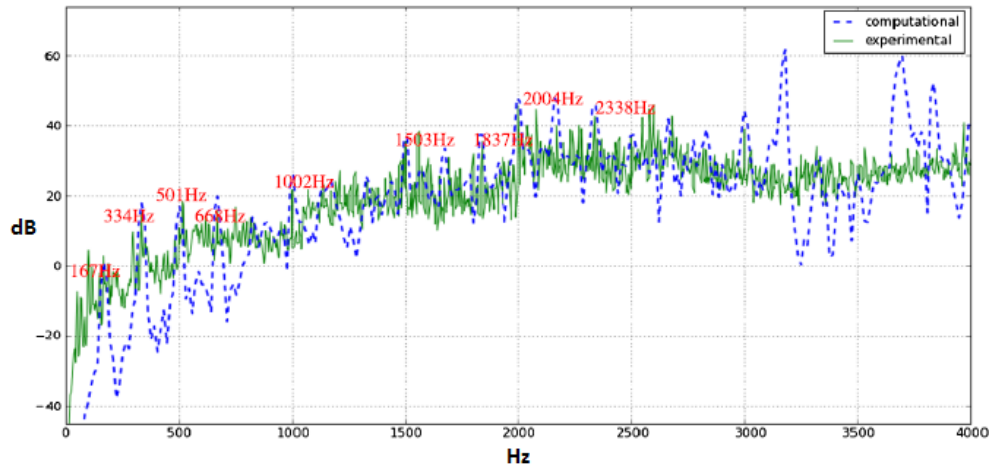


Figura 3.19 Gráfico de comparação dos resultados experimentais com os numéricos a 1000 rpm.
Adaptado de (40)

Tendo em conta o gráfico da Figura 3.19, observou-se que o 1º, 2º, 3º, 4º, 6º, 9º, 11º, 12º apresentam uma boa correspondência entre os dados numéricos e experimentais. Enquanto os restantes apresentam algumas diferenças. Depois dos 3000 Hz o modelo numérico torna-se bastante impreciso. Assim, concluiu-se que ocorre uma maior diferença entre o valor de ruído nas frequências altas do que nas frequências baixas.

Noise and vibration of a variable displacement vane oil pump for passenger car (41)

Estudo realizado por Byeongjin Kim e Kyuho Lee do departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Hanyang, na Coreia. Tem como propósito a análise de ruído e vibrações provocados por uma bomba de palhetas de caudal variável.

Materiais utilizados:

- Acelerómetro e um amplificador de sinal para medir o sinal da vibração;
- Microfone para medir o nível de ruído;
- Bomba de palhetas de caudal variável

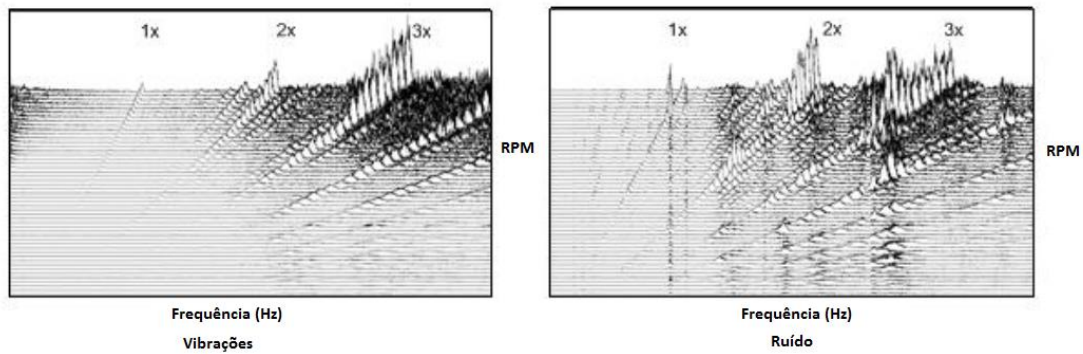


Figura 3.20 Nível de vibrações e ruído em função da frequência e da velocidade de rotação.
Adaptado de (41)

Após a análise experimental, concluíram que as vibrações e o ruído na bomba estão diretamente relacionados e que o seu nível aumenta consoante a frequência e a velocidade de rotação do rotor da bomba. Facto que é apoiado pela Figura 3.20.

An approach to an NVH investigation of a vehicle hydraulic pump (42)

Este estudo foi realizado na faculdade de Engenharia de Mecânica da Universidade de Kragujevac na Sérvia pela Dr.^a Jovanka Lukic, que apresenta um método para analisar o problema do ruído e vibrações nas bombas hidráulicas usadas na direção assistida nos veículos automóveis. O objetivo final deste trabalho foi investigar a influência que diferentes parâmetros têm no nível de ruído produzido pela bomba. Estes parâmetros são a aceleração da bomba e do motor na direção axial, tangencial e radial, a pressão de descarga da bomba e a velocidade de rotação da bomba.

Material usado no estudo:

- Motor elétrico SEW Eurodrive para o acionamento da bomba;
- Bomba radial de pistões;
- Transdutores axiais para medir as acelerações do motor e da bomba;
- Sensor de pressão para medir a pressão à saída da bomba;
- Microfone para medir no nível de pressão do som (ruído);
- Sensor ótico para medir a velocidade de rotação da bomba.

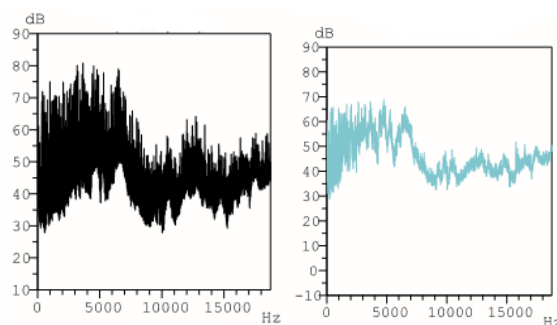


Figura 3.21 Nível de ruído para as pressões de 50 bar (esquerda) e 80 bar (direita). Adaptado de (42)

No trabalho experimental realizaram-se vários ensaios à bomba em causa, sendo que foram usadas pressões de 30, 50, 60, 70 e 80 bar, velocidades de rotação constantes de 1000, 2000, 3000, 4000 rpm e velocidade de rotação variável de 500 a 4000 rpm.

Na Figura 3.21 e na Figura 3.22 estão representados alguns dos resultados experimentais do estudo, onde é possível averiguar que o ruído produzido pela bomba aumenta consoante o aumento da sua velocidade.

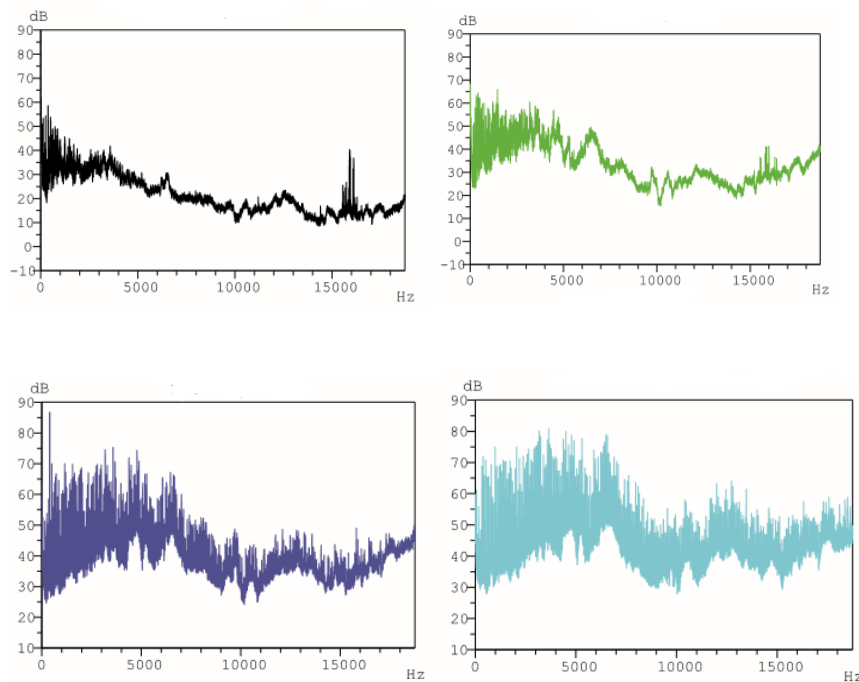


Figura 3.22 Resultados experimentais para as velocidades: 1000 rpm (a preto), 2000 rpm (a verde), 3000 rpm (a azul escuro), 4000 rpm (a azul claro). Adaptado de (42)

Tendo em conta os resultados baseados numa análise de funções de coerência (método que analisa a influência de vários inputs no output de um ensaio) do sistema em estudo concluiu-se que a velocidade de rotação e a pressão na descarga têm um papel importante no nível de pressão sonora da bomba. E que as vibrações da bomba também não podem ser negligenciadas como um fator relevante no ruído atmosférico provocado pela bomba.

3.4.2 Outros estudos

Noise, Vibration and Harshness (NVH) study on Malaysian Armed Forces tactical vehicle (43)

O objetivo principal deste estudo foi determinar se o veículo é adequado para os seus utilizadores, ou seja, se os níveis de NVH são menores do que a exposição diária limite para evitar a fadiga, perda de audição e diminuição no desempenho pessoal.

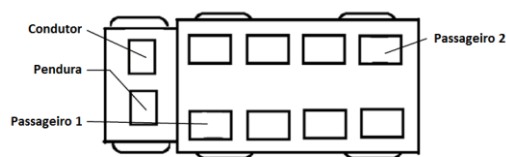


Figura 3.23 Locais de medida dos dados relativos às vibrações

Os níveis de ruído foram medidos na cabine dianteira e na cabine traseira pela utilização de um medidor de som. Quanto às vibrações, foram usados dois métodos diferentes: *hand-arm vibrations* (HAV) e *whole-body vibration* (WBV). No primeiro, as vibrações são medidas na ferramenta de trabalho, uma vez que esta transfere as suas vibrações para as mãos e braços do utilizador (no caso em estudo a ferramenta é o volante). No segundo, as vibrações são medidas na zona de contacto entre o corpo do utilizador e a fonte vibratória (neste caso as vibrações foram medidas nos assentos das localizações presentes na Figura 3.23). O equipamento utilizado para medição de vibrações foi um acelerómetro da Bruel & Kjaer.

Segundo o artigo, o limite de exposição diário (8 horas) de ruído, de HAV e WBV é respetivamente 90 dB, 5 m/s² e 1.15 m/s².

Resultados do estudo:

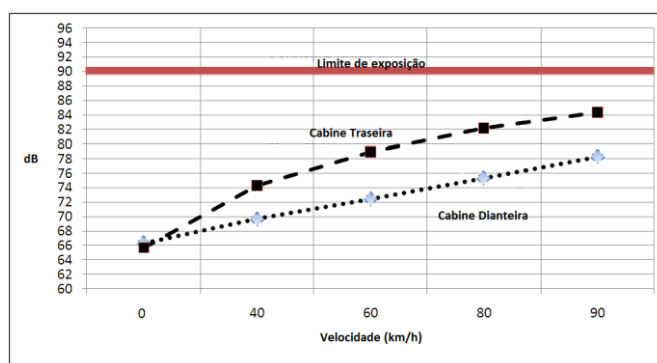


Figura 3.24 Nível do ruído na cabine dianteira e traseira em função da velocidade do veículo.

Adaptado de (43)

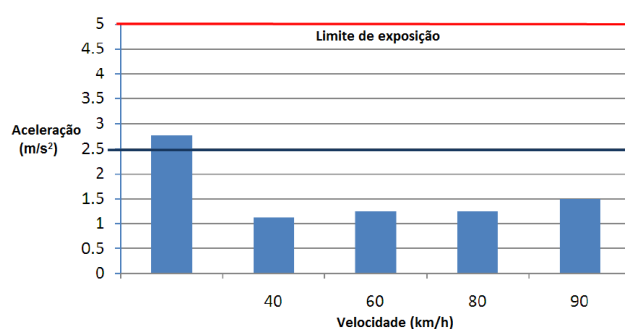


Figura 3.25 HAV em função da velocidade. Adaptado de (43)

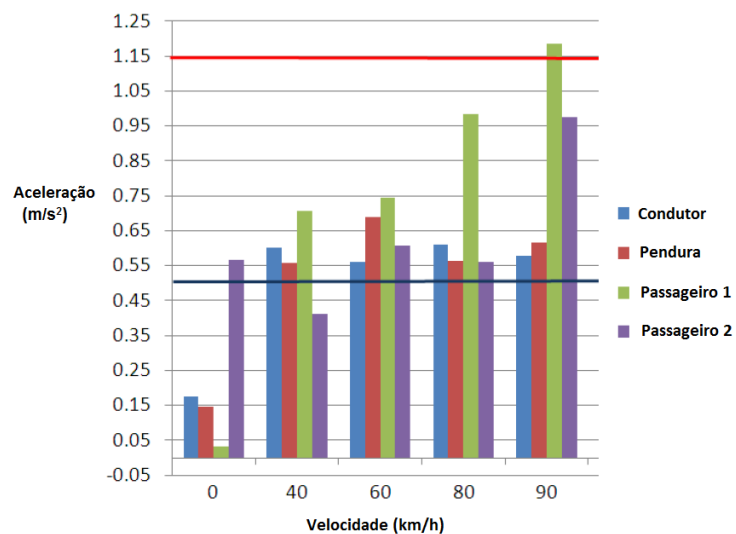


Figura 3.26 WBV em função da velocidade. Adaptado de (43)

Analisando os gráficos das figuras Figura 3.24, Figura 3.25 e Figura 3.26, é possível notar que o veículo cumpre com os requisitos dos limites impostos de ruído e vibrações, tendo apenas uma exceção: no teste WBV o limite de vibrações é ultrapassado na zona do passageiro 1 à velocidade de 90 km/h. Pode-se ainda concluir que à medida que a velocidade aumenta, também aumenta o nível de ruído e de WBV.

4 Análise dos dados numéricos e sua correlação com os dados experimentais

4.1 Introdução

O objetivo deste capítulo é, numa primeira instância, tratar e analisar os dados do sinal simulados pelo GT-Suite. Posteriormente serão também comparados estes dados numéricos com os resultados experimentais obtidos pelo banco de ensaios RO6 da Renault-Cacia.

O tratamento do sinal de pressão foi realizado com o *software* LMS Test. Lab da Siemens uma vez que os dados experimentais também serão tratados com este *software*. Pretende-se também verificar a correlação de resultados entre os *softwares* (GT-Suite e LMS), e caso seja válida, eliminar o fator *software* na análise da comparação entre o sinal numérico e experimental. Este *software* para além de ser capaz de realizar o tratamento de sinal, também tem a capacidade de fazer a aquisição de dados experimentais:

“LMS Test. Lab offers you a complete, integrated solution for test-based engineering that combines high speed multi-channel data acquisition with a full suite of integrated testing, analysis and report generation tools. LMS Test. Lab is designed to make testing more efficient and more convenient and significantly increases your productivity by delivering more reliable results, even when the availability of prototypes is dramatically reduced.” (44)

Sendo assim, o LMS, em conjunto com outras ferramentas, também foi utilizado para fazer a aquisição do sinal de pressão experimental da bomba H4 da Renault.

Antes do tratamento do sinal dos dados numéricos foi ainda necessária uma conversão dos dados provenientes do *software* de simulação, uma vez que estes não eram compatíveis com o *software* da Siemens. Para isto, foi criado um script em Matlab que importa os ficheiros originários do GT-Suite e os converte para a extensão .mat, que já apresenta compatibilidade.

Por fim, foram então analisados os resultados numéricos para várias condições de funcionamento da bomba e foi feita uma comparação com os dados experimentais a partir de gráficos de correlação.

4.2 Tratamento do sinal

4.2.1 Importação e conversão dos dados numéricos em Matlab

Foi utilizada uma estratégia de engenharia inversa para criar um script em Matlab presente no anexo 7.1. Deste modo, no LMS foram exportados dados pré-existent para um formato

compatível com o Matlab tendo como objetivo ver qual era a estrutura com que estes ficam quando analisados pelo último *software*.

Tendo por base esta estratégia e o manual do LMS, foi então concebido o código que dá compatibilidade aos dados provenientes do GT-Suite. Estes têm dois parâmetros: o tempo (s) e a pressão (bar). O script importa estes dados para duas matrizes que posteriormente são incorporadas em duas estruturas diferentes relativas aos valores do eixo X (tempo) e eixo Y (pressão). De notar ainda que o incremento do tempo tem que ter um valor fixo, de forma a ser possível ao LMS aplicar as transformadas de Fourier.

4.2.2 Tratamento do sinal em LMS

Neste subcapítulo é dada uma breve explicação do procedimento a aplicar, no LMS, ao sinal de pressão por forma a ser possível compará-lo com o sinal experimental. O anexo 7.2 apresenta um maior detalhe de como é utilizado o *software* para o tratamento do sinal.

O objetivo é então transformar os dados (provenientes do software de simulação GT-Suite) de pressão (bar) em função do tempo (s) para decibel (dB) em função da frequência (Hz). O tratamento de sinal efetuado pode ser retratado com base no diagrama da Figura 4.1.

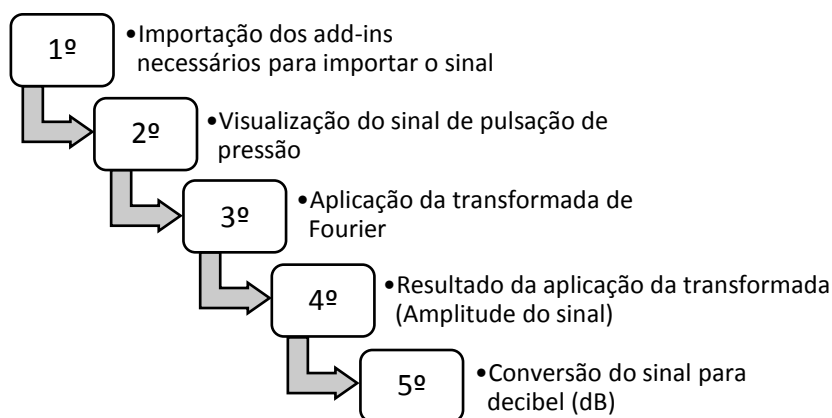


Figura 4.1 Diagrama com as etapas do tratamento de sinal

1ª Etapa – Importação dos add-ins - O LMS tem incorporado nele vários *add-ins* que podem ser importados consoante a necessidade do utilizador. O *Data Block Editor* é um deles. Este permite importar o sinal da pulsação de pressão para o LMS. Fornece também uma tabela com os valores desse sinal, o que permite uma fácil verificação dos valores importados serem os corretos.

2ª Etapa – Sinal de pulsação - Na Figura 4.2 é possível observar o sinal de pulsação de pressão simulado pelo GT-Suite. Este simula uma rotação da bomba a uma certa velocidade. No caso da figura o sinal foi simulado com a velocidade de 2200 rpm, daí o tempo de simulação ser cerca de 0.02 segundos. É possível ainda contemplar que ocorrem 7 pulsações de pressão, que correspondem à passagem das 7 palhetas da bomba pela zona de descarga.

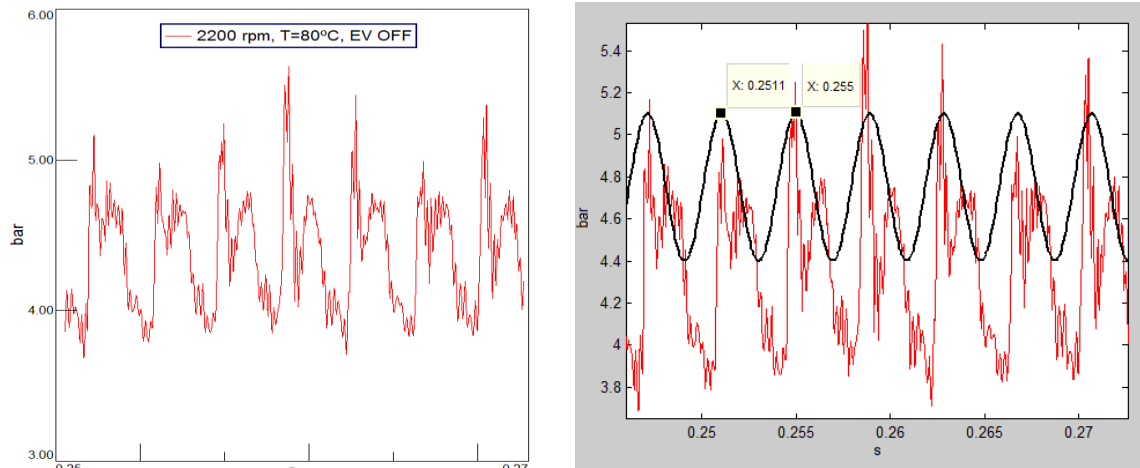


Figura 4.2 Sinal da pulsação da pressão (bar) em função do tempo (s) (à esquerda) e senoide representativa da frequência das pulsações de pressão (à direita)

Na Figura 4.2 pode-se observar a onda sinusoidal que representa a frequência das pulsações de pressão. Retirando os valores de tempo de duas cristas da onda seguidas é possível calcular o seu período e, consequentemente, a sua frequência:

$$T = 0.255 \text{ s} - 0.2511 \text{ s} = 0.0039 \text{ s} \quad (4.1)$$

$$f = \frac{1}{0.0039 \text{ s}} = 256.4 \text{ Hz} \quad (4.2)$$

Utilizando a equação 3.2 para calcular a frequência fundamental teórica das pulsações de pressão tem-se:

$$f = 7 * \frac{2200 \text{ rpm}}{60} * 1 = 256.66 \text{ Hz} \quad (4.3)$$

Que é um valor bastante próximo daquele que foi calculado segundo o gráfico.

3ª Etapa – Transformada de Fourier - Depois de importado o sinal da etapa anterior, como já foi referido anteriormente, é necessário aplicar a transformada de Fourier para passar do domínio do tempo para o domínio da frequência. Com este efeito, é utilizado o *Data Calculator*, que permite criar uma função por forma a aplicar a FFT aos vários sinais com as diferentes condições pretendidas.

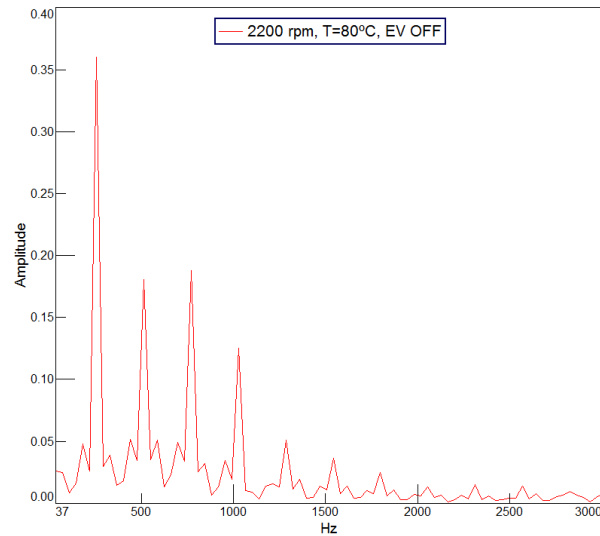


Figura 4.3 Amplitude do sinal da pulsação de pressão em função da frequência (Hz)

4ª Etapa – Amplitude do sinal - No seguimento das etapas anteriores é possível então obter o sinal presente na Figura 4.3, onde se pode ver a amplitude do sinal em função da frequência.

5ª Etapa – Ruído em função da frequência - Por fim, é necessário transformar a amplitude para dB aplicando a equação 3.17. O LMS faz isto automaticamente no *display* de visualização do gráfico. Obtém-se assim os valores de ruído da bomba em função da sua frequência (Figura 4.4).

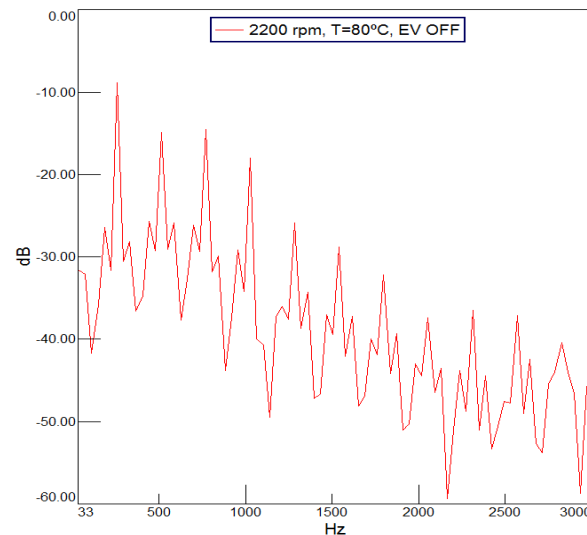


Figura 4.4 Sinal de ruído (dB) numérico em função da frequência (Hz)

4.3 Análise do sinal de simulação

4.3.1 Condições do estudo

Com o objetivo de perceber o comportamento de ruído do modelo numérico da bomba realizaram-se várias simulações para diferentes condições de temperatura, modo de funcionamento da electroválvula e da velocidade de rotação da bomba. Quanto à temperatura, foram consideradas temperaturas de óleo de 20°C e 80°C. Quanto ao modo de funcionamento da electroválvula, esta pode ter a configuração ON ou OFF, tal como já foi explicado no capítulo 2.2.3. Quanto à velocidade de rotação da bomba, foram realizadas simulações para os seguintes regimes: 750 rpm, 1000 rpm, 1500 rpm, 2000 rpm, 2200 rpm, 3000 rpm, 3500 rpm, 4000 rpm, 4500 rpm, 5000 rpm, 5500 rpm e 6000 rpm.

4.3.2 Correlação entre os harmónicos teóricos e numéricos da bomba

Como já foi referido anteriormente um dos critérios de validação do modelo numérico é a existência de uma boa correlação entre a frequência dos harmónicos teóricos e numéricos da bomba. Tendo isto em conta e utilizando o LMS, retiraram-se os valores das frequências nos picos de ruído (harmónicos) observados na Figura 4.4, para depois compará-los com os valores teóricos. A velocidade da bomba utilizada para o efeito foi de 2200 rpm, com a temperatura do óleo a 80°C, no modo OFF da electroválvula, uma vez que esta é uma das condições que vai ser comparada experimentalmente. Assim utilizando a equação 3.2 (para calcular os harmónicos teóricos) e uma ferramenta própria do LMS é possível fazer o gráfico de correlação representado na Figura 4.5 com base na Tabela 7.1 presente no anexo 7.3.

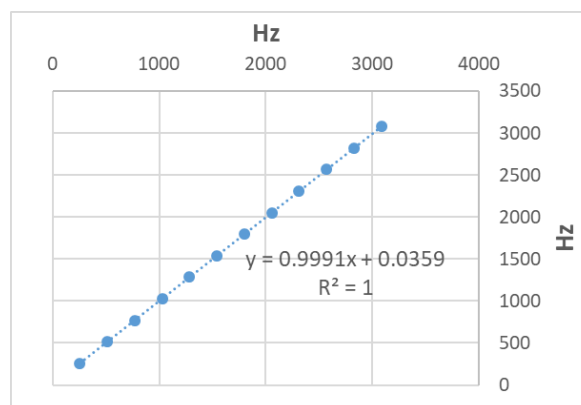


Figura 4.5 Gráfico de correlação entre os harmónicos teóricos e numéricos

Tendo em conta os valores do declive, da intersecção da reta com o eixo e do coeficiente de correlação ao quadrado, pode-se concluir que existe uma correlação quase perfeita entre os harmónicos teóricos e numéricos.

4.3.3 LMS vs. GT-Suite

O *software* GT-Suite também tem a capacidade de fazer o tratamento de sinal. Portanto, numa fase inicial deste estudo foi realizada uma comparação entre o tratamento realizado pelo GT-Suite e o LMS com o objetivo de perceber as diferenças no resultado final entre os dois *softwares*. Para isto foi utilizada a estratégia de analisar os valores de ruído nos dois primeiros harmónicos para as condições acima descritas e a partir destes valores construir os gráficos de comparação e de correlação para as diferentes circunstâncias apresentados na Figura 4.6 e na Figura 4.7.

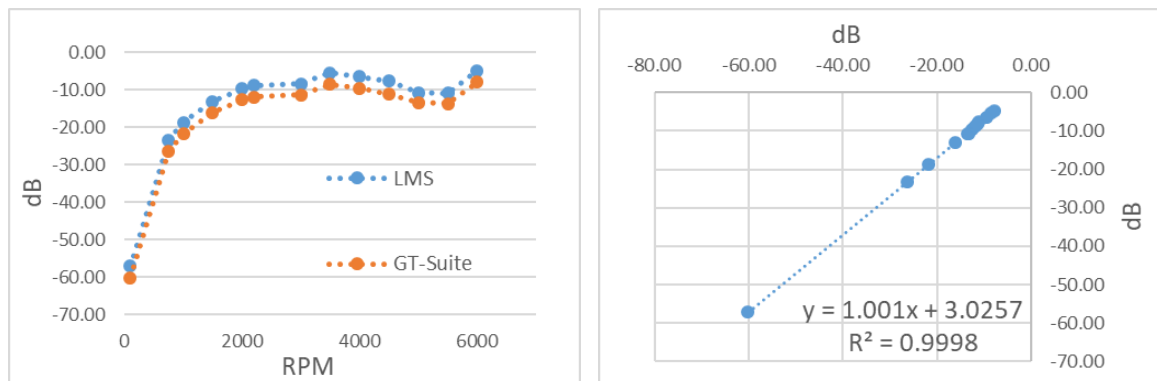


Figura 4.6 Gráficos de comparação e de correlação entre o GT-Suite e LMS para T=80°C, EV OFF e 1º Harmónico

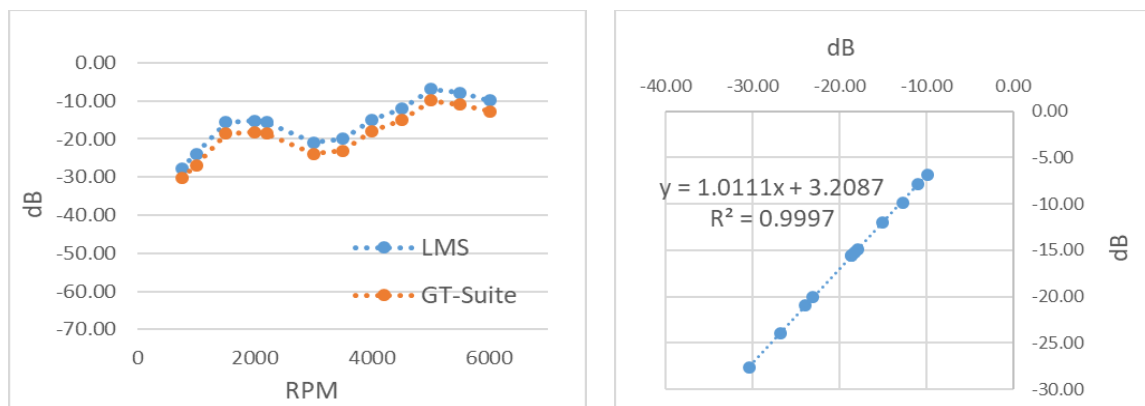


Figura 4.7 Gráficos de comparação e de correlação entre o GT-Suite e LMS para T=20°C, EV ON e 2º Harmónico

Análise dos resultados

Analisando os gráficos é possível observar que existe sempre uma diferença de cerca de 3 dB entre o tratamento de dados feito pelo LMS e o GT-Suite. Este facto é comprovado pelo valor da intersecção da reta da linha de tendência nos gráficos de correlação, que anda sempre perto de 3. Esta diferença é sempre constante para todos os casos em estudo exibidos acima e nas restantes figuras presentes no anexo 7.4.

Uma vez que ambos os softwares utilizam a equação 3.17 para passar de amplitude para ruído (dB), esta diferença apenas pode ser explicada pela diferente aplicação das transformadas de Fourier que ambos os softwares fazem. Apesar de esta disparidade ser pequena, o LMS foi o software utilizado para compreender o comportamento da bomba relativo aos dados numéricos, pois os experimentais também foram tratados pelo mesmo *software*.

4.3.4 Análise do ruído em função da velocidade de rotação

Este subcapítulo tem como objetivo perceber como é que evolui o ruído em função da velocidade de rotação da bomba para as diferentes condições de funcionamento. Com este fim, foi utilizada a mesma estratégia do capítulo anterior, ou seja, mais uma vez para os diferentes regimes estudados analisou-se o valor de ruído no 1º e 2º harmónicos. No entanto, neste caso apenas foram utilizados valores dados pelo LMS.

Com base nos valores retirados do *software*, fizeram-se os gráficos apresentados na Figura 4.8 (resultados numéricos), onde se encontram sobrepostas as curvas para as diferentes temperaturas e modos de funcionamento da electroválvula.

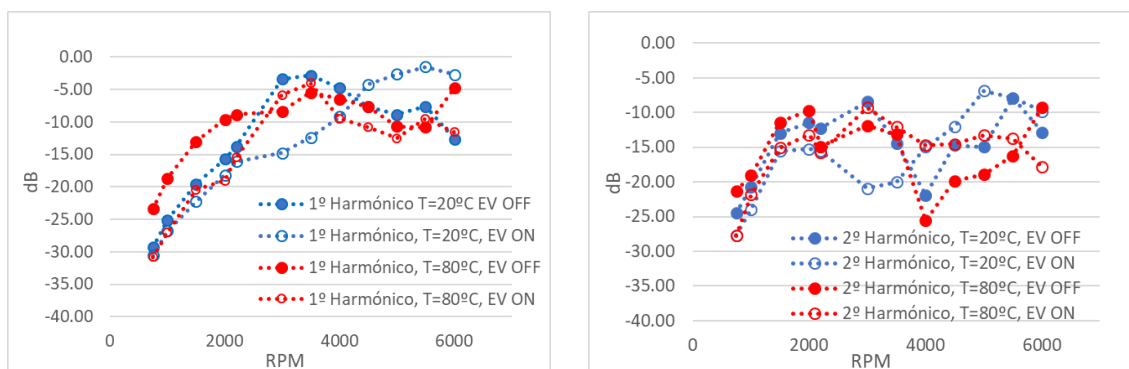


Figura 4.8 Ruído (dB) em função da velocidade de rotação (rpm) para o 1º Harmónico (à esquerda) e para o 2º Harmónico (à direita)

Constata-se que, para ambos os harmónicos, o ruído tende a aumentar quase linearmente até às 2000 rpm. A partir desta velocidade ocorrem oscilações nos valores de ruído, sendo que a amplitude destas oscilações é maior no caso do segundo harmónico. É possível assim concluir que o ruído é mais estável no primeiro harmónico do que no segundo quando a velocidade de rotação da bomba aumenta.

Observa-se ainda que, para o mesmo harmónico e mesma temperatura, até às 2000 rpm, o modo de funcionamento da electroválvula não tem grande influência no comportamento do ruído. Depois deste valor, o ruído evolui de forma diferente consoante a configuração da electroválvula. Esta última observação é mais visível no gráfico correspondente ao 2º harmónico da Figura 4.8, onde ocorre uma queda mais acentuada do nível de ruído no modo OFF da electroválvula em ambas as temperaturas. Enquanto no modo ON, o ruído apresenta um comportamento diferente na mesma zona do regime. Neste caso, quando o óleo está a 20°C, o ruído tem um

comportamento oposto ao modo OFF. Quando está a 80°C ocorre na mesma uma diminuição, no entanto esta é menos evidente.

Resumidamente, é possível observar um comportamento linear da bomba até cerca das 2000 rpm, em que o ruído aumenta consonante o aumento da velocidade de rotação. Após este regime, torna-se difícil prever a sua evolução, uma vez que este é mais afetado pelas condições a que a bomba está sujeita.

4.3.5 Análise do ruído em função do espectro da frequência

Ao contrário do subcapítulo anterior em que o ruído foi analisado em função da velocidade de rotação da bomba, neste o objetivo é perceber como é que ele se comporta em função do espectro da frequência. Posto isto, para um certo regime de rotação, foram retirados os valores de ruído na frequência fundamental até ao harmónico mais próximo da frequência de 3000 Hz.

Os regimes escolhidos para serem analisados têm o valor de 2200 rpm, 3000 rpm e 4000 rpm. Estas velocidades foram seleccionadas pois estão no intervalo de regimes do motor em que este normalmente opera. Posteriormente, estes regimes serão comparados com os resultados experimentais, no subcapítulo 4.5.2.

Numa primeira fase apresentam-se os gráficos onde se sobrepuseram as curvas para a temperatura do óleo igual a 20°C e a 80°C, com o propósito de identificar a influência que esta tem no ruído (Figura 4.9, Figura 4.10 e Figura 4.11). Numa segunda fase, sobrepuseram-se as curvas com a electroválvula a ON e a OFF (Figura 4.12, Figura 4.13 e Figura 4.14) mantendo o resto das condições estáticas (temperatura e velocidade de rotação), com o intuito de compreender qual era o efeito que a EV tem no sinal de ruído ao longo do espectro da frequência.

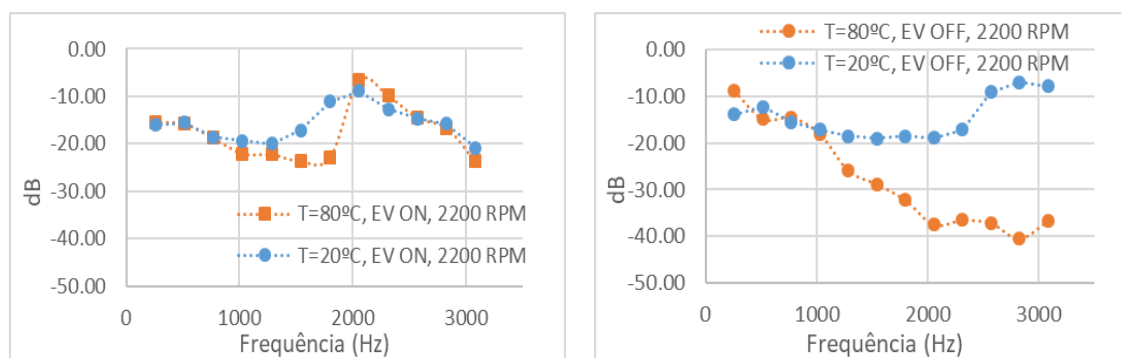


Figura 4.9 Gráficos de comparação do ruído para diferentes temperaturas do óleo (20°C vs. 80°C), com uma velocidade de 2200 rpm, com EV ON (à esquerda) e com EV OFF (à direita)

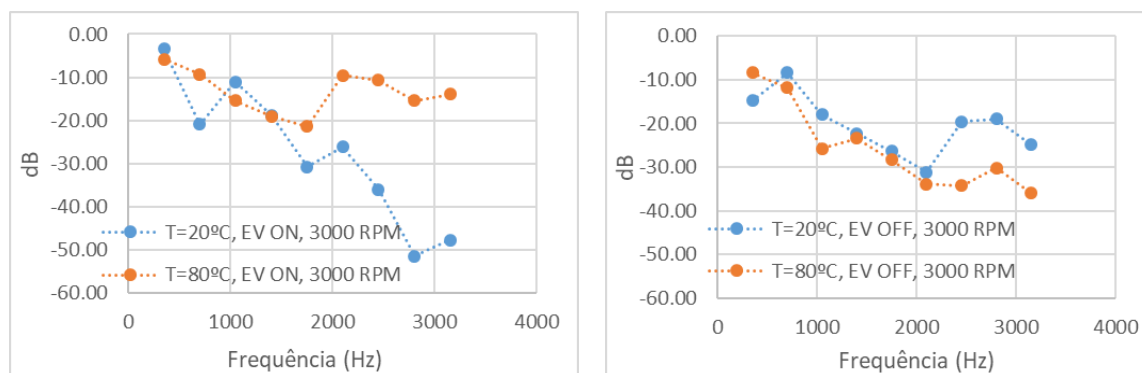


Figura 4.10 Gráficos de comparação do ruído para diferentes temperaturas do óleo (20°C vs. 80°C), com uma velocidade de 3000 rpm, com EV ON (à esquerda) e com EV OFF (à direita)

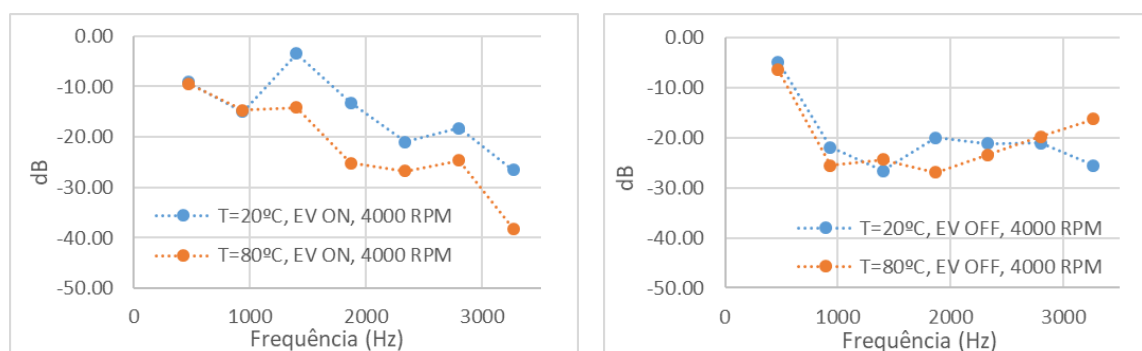


Figura 4.11 Gráficos de comparação do ruído para diferentes temperaturas do óleo (20°C vs. 80°C), com uma velocidade de 4000 rpm, com EV ON (à esquerda) e com EV OFF (à direita)

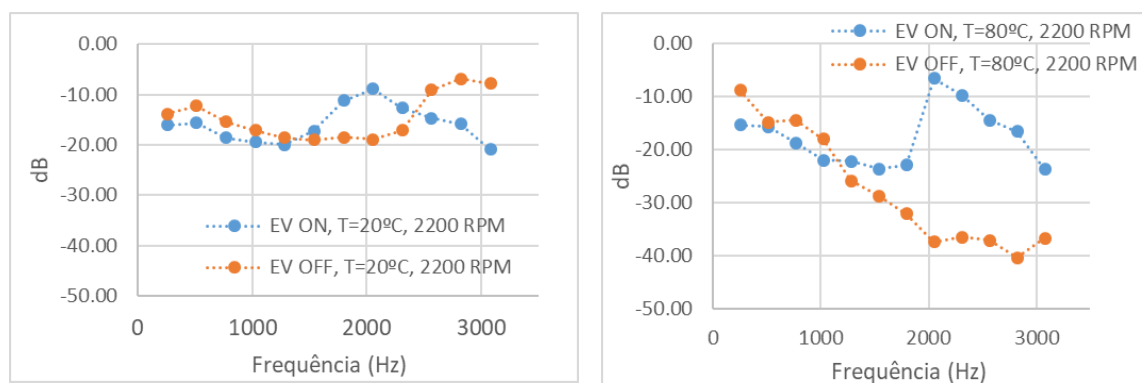


Figura 4.12 Gráficos de comparação do ruído para diferentes modos de configuração da electroválvula (EV ON vs. EV OFF), com uma velocidade de 2200 rpm, com temperatura do óleo a 20°C (à esquerda) e 80°C (à direita)

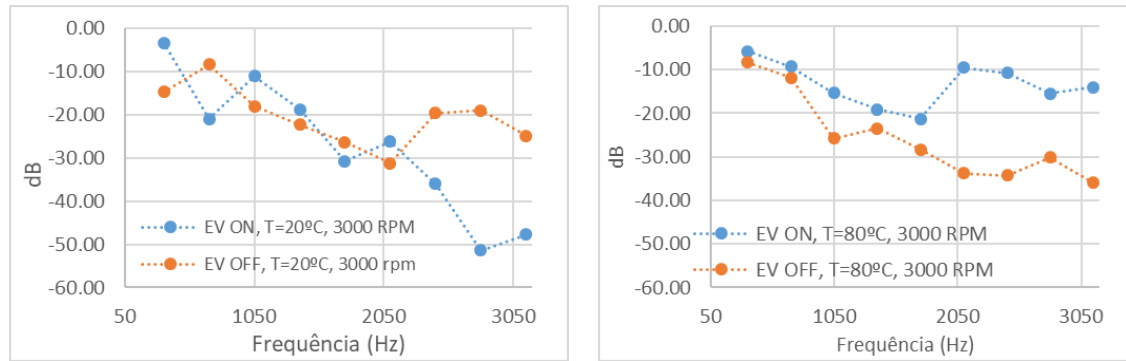


Figura 4.13 Gráficos de comparação do ruído para diferentes modos de configuração da electroválvula (EV ON vs. EV OFF), com uma velocidade de 3000 rpm, com a temperatura do óleo a 20°C (à esquerda) e 80°C (à direita)

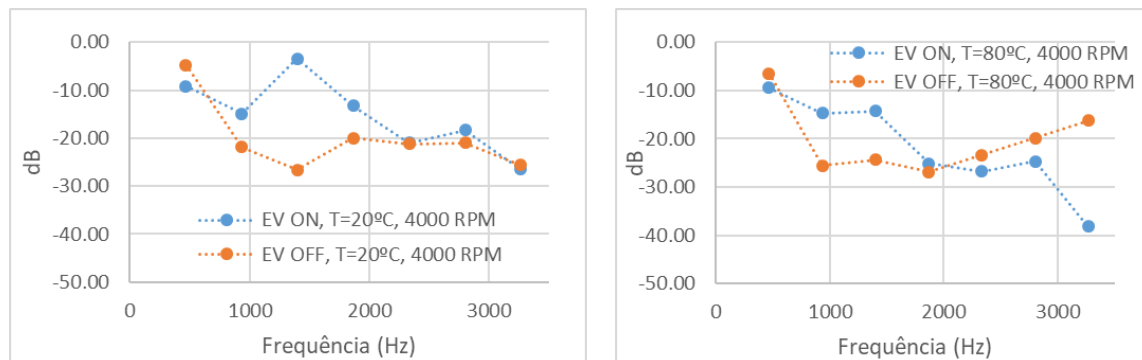


Figura 4.14 Gráficos de comparação do ruído para diferentes modos de configuração da electroválvula (EV ON vs. EV OFF), com uma velocidade de 4000 rpm, com a temperatura do óleo a 20°C (à esquerda) e 80°C (à direita)

No regime das 2200 rpm, nota-se que no modo ON a temperatura tem pouca influência no nível de ruído do sinal. Em OFF, a afirmação anterior é apenas verdade para os primeiros 4 harmónicos. Depois desta zona, existe uma diferença na evolução do ruído entre as duas temperaturas, em que a 20°C, este tem a tendência de se manter na mesma gama de valores, tendo depois uma subida por volta dos 2200 Hz, enquanto a 80°C tende a diminuir linearmente. Comparando os dois modos da EV (e mantendo a mesma temperatura), constata-se que para ambos os casos, numa primeira fase, o ruído tem um comportamento semelhante até aos 1500 Hz, em que diminui linearmente. Esta diminuição é mais visível com a temperatura a 80°C. A partir desta frequência, ocorre, mais uma vez, uma discrepância na evolução do sinal para os dois modos de funcionamento.

Nas 3000 rpm, observa-se que nos harmónicos até à frequência de 2000 Hz ocorre uma melhor correlação no comportamento do ruído entre as duas temperaturas em estudo quando a electroválvula está OFF do que quando está ON. A partir deste ponto, começa a existir uma diferença entre a intensidade de ruído para ambas as temperaturas. Esta diferença é maior quando a electroválvula se encontra no modo ON. Assim, mudando a temperatura do óleo e mantendo o modo de configuração da EV, o comportamento do sinal para ambas as temperaturas apresenta uma maior similaridade quando a electroválvula se encontra OFF do que quando está ON.

Analisando os gráficos da Figura 4.13 é possível ainda constatar que o sinal é mais instável no primeiro do que no segundo, pois quando a temperatura se encontra a 20°C, até aos 2000 Hz, o ruído ora é mais intenso no caso da EV ON ora é mais intenso no caso da EV OFF, enquanto a 80°C o ruído é sempre maior no modo ON. Novamente, para ambas as temperaturas e a partir de uma certa frequência, ocorre uma dispersão no nível de ruído entre os dois modos da electroválvula.

Por fim, no regime de 4000 rpm, observando os gráficos da Figura 4.11, constata-se que apesar de no modo OFF existirem harmónicos que têm uma intensidade próxima para as duas temperaturas, no modo ON o comportamento do sinal entre a temperatura de 20°C e 80°C apresenta uma maior semelhança, na medida em que quando o nível de ruído desce ou sobe numa temperatura, o mesmo ocorre na outra. No modo OFF isto já não acontece. No caso da Figura 4.14, ocorre, em ambas as temperaturas, uma diferença de ruído nos harmónicos situados entre os 750 e 1500 Hz, em que este é maior no modo ON. Depois desta frequência, com a temperatura do óleo a 20°C, o comportamento do sinal é muito semelhante nos dois modos da EV, enquanto com a temperatura a 80°C, o ruído tende a aumentar nas frequências próprias do modo OFF, e a diminuir nas do modo ON.

Tendo em conta os gráficos apresentados e as observações realizadas anteriormente, segundo o modelo numérico, é possível concluir que o sinal do ruído ao longo do espectro da frequência não tem um comportamento previsível uma vez que a intensidade nos harmónicos tem uma grande variância para os diferentes regimes, temperaturas e modos de configuração da electroválvula. Sendo assim, não é possível tirar conclusões quanto ao efeito da temperatura ou modo de configuração da electroválvula na intensidade do ruído simulado pelo modelo numérico.

Nos gráficos acima a intensidade do ruído apresenta valores negativos. Com o intuito de compreender o motivo deste comportamento, primeiro é necessário perceber que o decibel não é uma unidade absoluta, mas sim de comparação em relação a um valor de referência. Uma vez que o valor de referência utilizado (1 bar) é maior do que a amplitude do sinal de pressão à saída da bomba, os valores de ruído terão que ser negativos. Para se conseguir quantificar o ruído provocado pela bomba que é captado pelo ouvido humano, seria necessário a utilização de um microfone como aqueles que estão apresentados no subcapítulo 3.3.3.

4.4 Método experimental e aquisição dos dados

Como já foi explicado anteriormente, os dados experimentais do sinal de pressão na zona de descarga da bomba foram adquiridos com o LMS. Com este intuito, usou-se o módulo “*Signature Acquisition*” que permite obter os valores dos dados vindos da sonda de pressão. Esta é colocada estrategicamente no Banco RO6 por forma a captar o sinal de pressão à saída da bomba. O sinal é enviado para o condicionador de sinal, que processa os dados de pressão e os envia para o SCADAS Recorder que, por sua vez, processa o sinal do condicionador e o envia para o computador que contém o LMS instalado (Figura 4.18). A este sinal é aplicado o mesmo processo presente no subcapítulo 4.2 para depois serem comparados os dados numéricos com os dados experimentais.

4.4.1 Banco de ensaios RO6

O banco de ensaios RO6 é utilizado para ensaiar bombas de óleo fabricadas na Renault-Cacia com condições variáveis de velocidade, temperatura e de pressão. Os ensaios realizados permitem caracterizar o funcionamento das bombas em termos de caudal, pressão, e binário para as diferentes condições de funcionamento. Este também pode ser utilizado para realizar ensaios de NVH da bomba utilizando-se um equipamento complementar.



Figura 4.15 Banco de ensaios RO6

O banco apresentado na Figura 4.15 é constituído por um quadro que sustenta:

- Um braço com um ângulo ajustável (Figura 4.16), que dá suporte à estrutura de fixação da bomba, a um motor elétrico rotativo, e uma cabine de potência que está equipada com um controlador para o acionamento do motor elétrico;
- Um circuito hidráulico para regular a pressão e para medir débitos e pressões;

Para além disso, possui ainda um tanque de óleo (Figura 4.16) e manivela de ajustamento do ângulo do braço (à direita)) montado sobre uma mesa de elevação, em que a temperatura é regulada termicamente.

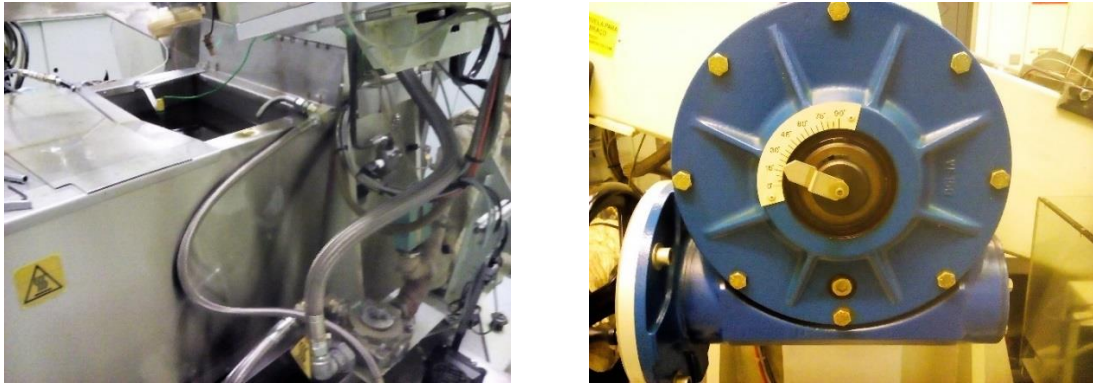


Figura 4.16 Tanque do óleo (à esquerda) e manivela de ajustamento do ângulo do braço (à direita)

O objetivo do banco é ensaiar bombas de óleo com condições o mais próximas possível daquelas que se encontram no motor em que é posteriormente montada. Posto isto, o motor elétrico tem a função de acionar o pinhão de acionamento da bomba a ensaiar, o braço tem um ângulo ajustável para permitir que a bomba seja fixada no seu suporte na mesma posição em que é montada no motor, e o circuito hidráulico possibilita a que se possam gerar pressões variáveis na zona de descarga da bomba. O controlo desta pressão é proporcionado por uma servo-válvula e por um sensor de pressão. A medida do caudal é realizada através de um *caudalímetro*.



Figura 4.17 Cabine de potência (à esquerda) e grupo de termorregulação (à direita)

A temperatura do óleo do tanque é regulada por um grupo de termorregulação (Figura 4.17) constituído por um aquecedor e duas unidades de refrigeração que contêm um circuito com um fluido refrigerante. A temperatura é transmitida ao óleo por um permutador de calor. O tanque e o grupo de termorregulação estão ligados por dois tubos flexíveis.

A mesa de elevação é alimentada pela cabine de potência e tem como função ajustar a altura do tanque por forma a que o chupador da bomba de óleo fique completamente mergulhado e para que seja possível a troca de bombas.

A sala onde se encontra o banco RO6 contém ainda um exaustor para evacuação de calor e vapores provenientes do aquecimento do óleo.

Tabela 4.1 Principais características do banco RO6. Adaptado de (45)

Principais características	
Orientação do braço (graus)	0° a 90°
Altura da borda superior do tanque de óleo ao chão (mm)	900 a 14000 mm
Capacidade do tanque de óleo (L)	150 L
Velocidade de acionamento do fuso (rpm)	0 a 8000 rpm +/- 5 rpm
Regulação da temperatura do óleo (Celcius)	-20°C até 135°C +/- 1°C
Gradiente de subida da temperatura (Celcius)	2°C/min
Gradiente de descida da temperatura (Celcius)	10°C/hora
Regulação de pressão na zona de descarga da bomba (bar)	0 a 10 bar +/- 1%

4.4.2 Procedimento Experimental

A bomba H4 é montada no suporte fixo do banco RO6 (Figura 4.19) através de dois parafusos M8 de cabeça hexagonal. Existe ainda uma zona de amortecimento que permite diminuir a turbulência com que o óleo chega novamente ao tanque após completar o seu circuito. Como se pode observar na Figura 4.20, a sonda de pressão é montada perto da zona de descarga, por forma a conseguir captar as pulsações de pressão. Na Figura 4.18 é possível observar o esquema simplificado da montagem experimental utilizada para adquirir os dados experimentais do ruído com origem no fluido da bomba.

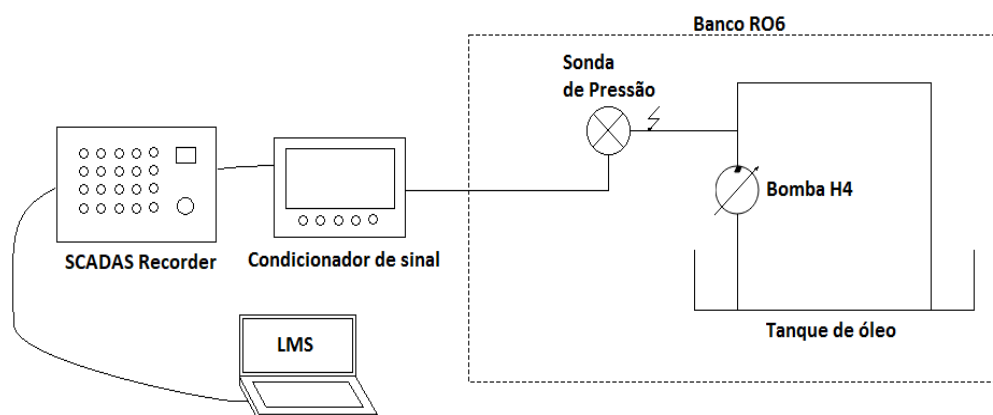


Figura 4.18 Esquema da montagem experimental

O banco RO6 é controlado por outro computador. É neste que são dadas as instruções ao banco para ele operar sobre as condições pretendidas, como o regime da bomba, a temperatura do óleo e a pressão de descarga.

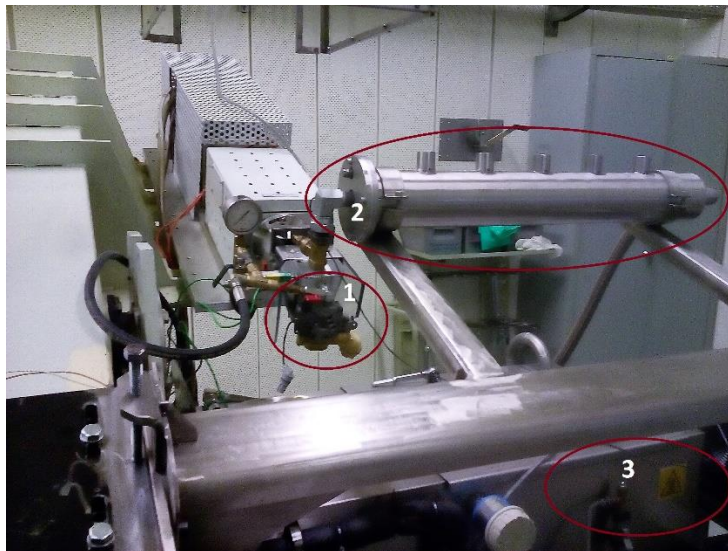


Figura 4.19 Banco RO6

Legenda:

- 1 – Bomba H4
- 2 – Zona de amortecimento do óleo, antes de entrar novamente no tanque
- 3 – Tanque do óleo

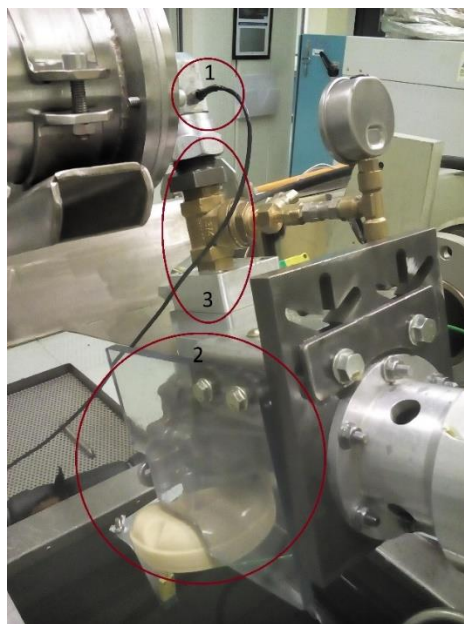


Figura 4.20 Sonda de pressão montada no banco

Legenda:

- 1 – Sonda de pressão
- 2 – Bomba H4
- 3 – Zona de descarga do óleo

O sinal que sai da sonda de pressão é do tipo analógico. A maioria destes tipos de sinal necessitam de ser manipulados por forma a que possam ser digitalizados (46). Esta é a função do condicionador de sinal, presente na Figura 4.21. Por fim o SCADAS Recorder transforma o sinal analógico em digital para que possa ser lido pelo *software* LMS presente no computador. A fonte de tensão é usada quando se pretende ensaiar a bomba com a electroválvula no modo de

configuração ON. É-lhe imposta uma diferença de potencial de cerca de 15 V com uma intensidade da corrente de cerca de 0.5 A.



Figura 4.21 Condicionador de sinal (à esquerda) e fonte de tensão (à direita)

4.4.3 Aquisição do sinal (*Signature Acquisition*)

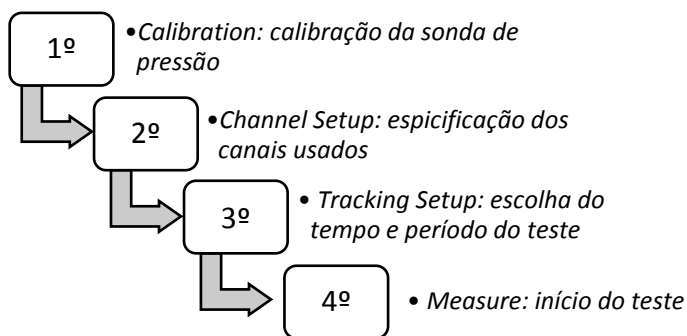


Figura 4.22 Etapas para a aquisição dos dados

A aquisição dos dados de pressão experimental é então realizada através do uso do módulo *Signature Acquisition* do LMS. Este módulo apresenta vários menus: o *Calibration*, o *Channel Setup*, o *Tracking Setup* e o *Measure*.

O primeiro possibilita a realização da calibração dos canais ativados através do cálculo da sua sensibilidade. Para isto, é necessário determinar com precisão a relação entre a carga que é aplicada no transdutor e o seu output elétrico. Teoricamente, uma carga sinusoidal, gerada por um calibrador de pressão, com uma amplitude (bar) e frequência conhecida deverá ser imposta ao transdutor. Sendo medido o sinal elétrico de saída (V) do mesmo. A partir da relação entre as duas amplitudes dos sinais de entrada e saída, é possível calcular a sensibilidade do transdutor:

$$Sensibilidade(V/bar) = \frac{A_{saída}(V)}{A_{entrada}(bar)} \quad (4.4)$$

Assim a sensibilidade é o aumento do output elétrico (V) por unidade de carga (bar). Sabendo este valor, consegue-se saber que valor de pressão é que a sonda está a medir a partir da seguinte equação:

$$Output\ elétrico(V) = Carga(bar) * Sensibilidade\ (V/bar) + offset(V) \quad (4.5)$$

O offset é o output elétrico do transdutor quando nenhuma carga é aplicada. Este é um valor fornecido pelo fornecedor da sonda de pressão.

No entanto a Renault-Cacia, neste momento, não detém calibradores de pressão para realizar esta operação. Deste modo, a calibração é feita por comparação de valores entre a sonda a calibrar e outra sonda de um calibre maior que já está previamente calibrada. Após a comparação destes valores são ajustados os valores no LMS que influenciam a sensibilidade do sinal, por forma a que os valores entre as duas sondas tenham uma boa coincidência.

O *Channel Setup* permite especificar os canais e características dos transdutores que irão ser usados para a aquisição dos dados, como a sua sensibilidade e o seu offset. Neste caso, apenas existe um canal correspondente a uma sonda de pressão que mede em bar.

Existem várias estratégias para a realização do controlo do rastreamento dos dados. Estas podem ser escolhidas a partir do *Tracking Setup*. Neste estudo foi utilizada a estratégia de rastreamento por tempo, onde é especificado o tempo de aquisição dos dados e o intervalo a que essa aquisição é realizada. Desta forma, foi escolhido um tempo de 30 segundos com um incremento de 0.001, sendo que foram adquiridos 30000 dados durante cada teste (Figura 4.23).

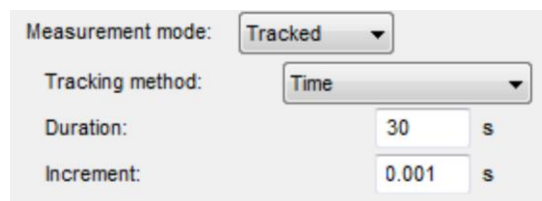


Figura 4.23 Parâmetros do *Tracking*

Por fim, o último menu contém dois submenus importantes para a obtenção do sinal. O *Ranges*, que dá a possibilidade de verificar entre que valores a pressão irá oscilar durante o estudo. Isto é relevante, na medida em que este menu possui um aviso, o *overload*, que se ativar significa que o transdutor captou um valor que está fora do normal, havendo assim a necessidade de repetir o teste. E o *Measure* (Figura 4.24) (possui o mesmo nome do menu principal) onde é possível armar os canais relativos aos transdutores e começar o teste de aquisição do sinal (47).

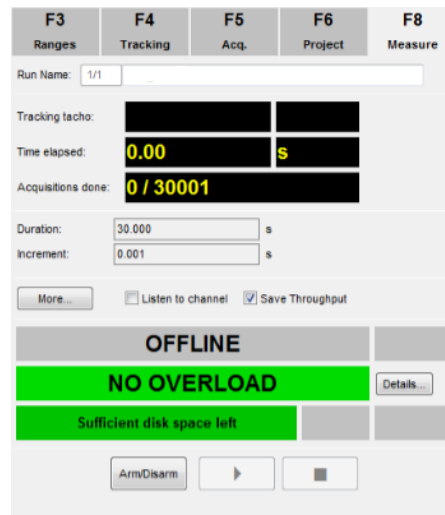


Figura 4.24 Display do Measure

4.5 Comparação dos resultados Numéricos vs. Experimentais

A análise da correlação entre os dados numéricos e experimentais foi realizada apenas até à frequência correspondente ao 3º harmónico. Este critério foi utilizado porque é nesta gama de frequências que a bomba poderá vir a interferir com os restantes componentes do *powertrain*. Portanto apenas é necessário ocorrer uma boa correlação do modelo com os dados numéricos neste intervalo de frequências.

Nos ensaios experimentais, obtiveram-se dados para uma velocidade de rotação da bomba de 2200 rpm, 3000 rpm e 4000 rpm no modo de configuração OFF e ON da electroválvula. A temperatura do óleo manteve-se constante a 80°C. Foram ensaiadas 4 bombas H4, sendo que para cada bomba efetuaram-se 4 medidas da pulsação de pressão na zona de descarga. Os valores dos gráficos apresentados nos resultados são o resultado da média aritmética das 4 bombas e 4 medidas. Em anexo estão presentes as tabelas com os valores retirados do LMS, bem como os gráficos correspondentes.

4.5.1 Resultados experimentais

Na Figura 4.25 está representado o sinal da pulsação de pressão de um ensaio experimental para uma velocidade de rotação na bomba de 2200 rpm, com a temperatura do óleo a 80°C no modo de configuração OFF da electroválvula. Tal como na Figura 4.2, observam-se as 7 pulsações de pressão resultantes da passagem das 7 palhetas da bomba pela zona de descarga da mesma. A este sinal, tal como no caso do numérico, aplicaram-se as transformadas de Fourier e de seguida a equação 3.17, por forma a obter o gráfico do ruído em função da frequência, representado na Figura 4.26. Neste é possível verificar que os harmónicos experimentais também se correlacionam bastante bem com os da fórmula teórica, uma vez que no gráfico existe um pico de ruído perto das frequências dos harmónicos teóricos.

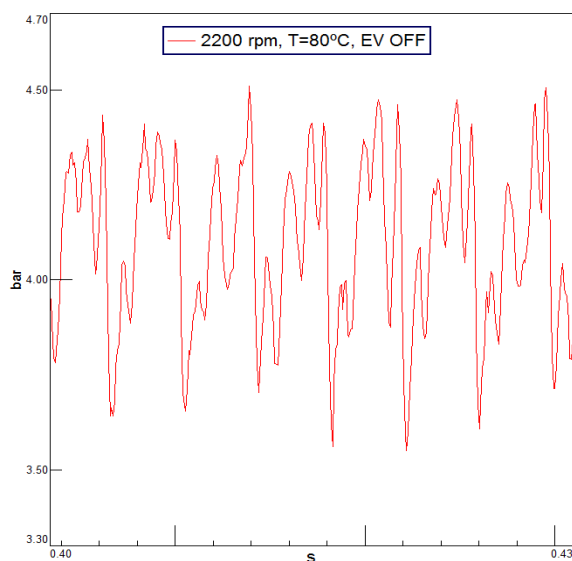


Figura 4.25 Sinal da pulsação de pressão experimental (bar) em função do tempo (s)

Comparando os sinais de ruído numérico (Figura 4.4) e experimental, constata-se que o último apresenta na faixa entre os -60 dB e -110 dB uma zona bastante “ruidosa”, o que não acontece nos dados numéricos. Este “ruído” designa-se por ruído aleatório e provém do facto de se adquirirem valores de um sistema real, logo, é normal que este ocorra. Além disso, ele é indesejável e desprezável, sendo que apenas os picos de intensidade interessam na comparação com os dados de simulação.

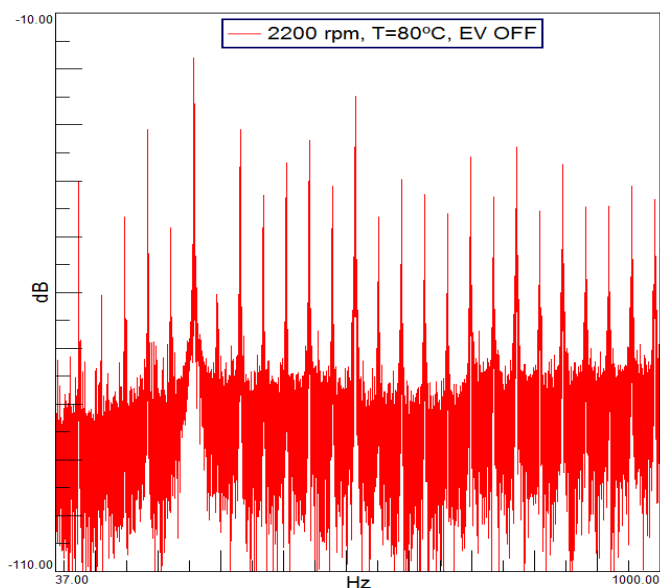


Figura 4.26 Sinal do ruído experimental (dB) em função da frequência (Hz)

4.5.2 Comparação e correlação dos dados experimentais com os numéricos

Na Figura 4.27 à Figura 4.32, são apresentados os resultados experimentais e numéricos do ruído (dB) em função da frequência (Hz), para as condições já referidas anteriormente. Paralelamente são exibidas as regressões lineares entre os mesmos bem como o cálculo da correlação.

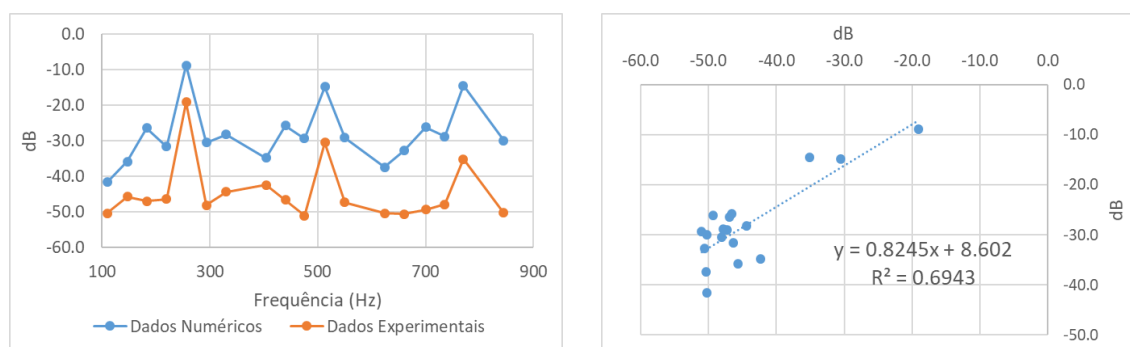


Figura 4.27 Gráficos de comparação (à esquerda) e correlação (à direita) entre os dados numéricos e experimentais para uma velocidade de 2200 rpm, T=80°C e EV OFF

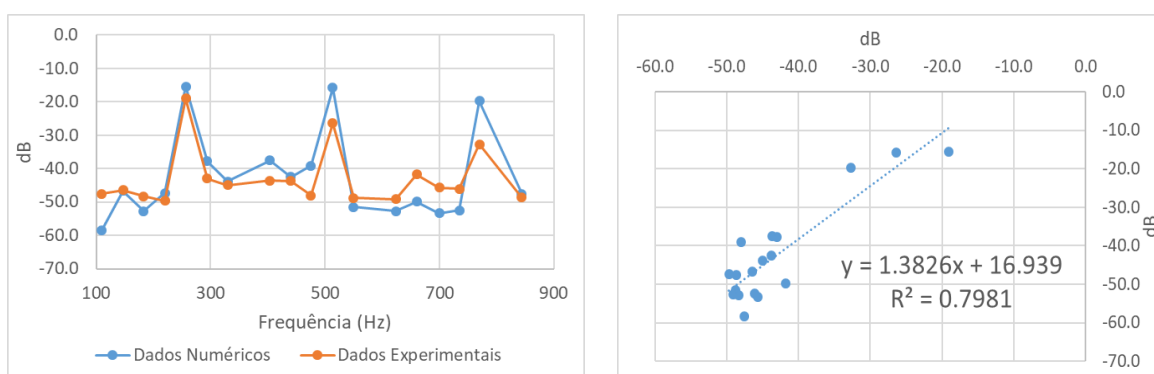


Figura 4.28 Gráficos de comparação (à esquerda) e correlação (à direita) entre os dados numéricos e experimentais para uma velocidade de 2200 rpm, T=80°C e EV ON

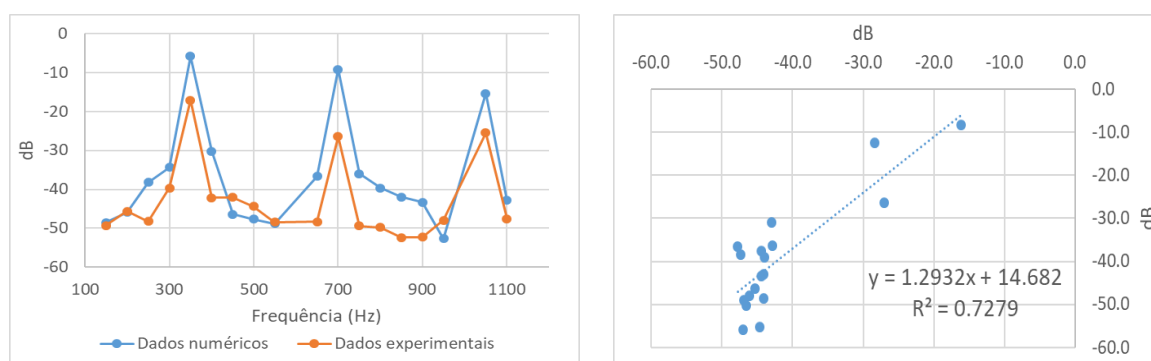


Figura 4.29 Gráficos de comparação (à esquerda) e correlação (à direita) entre os dados numéricos e experimentais para uma velocidade de 3000 rpm, T=80°C e EV OFF

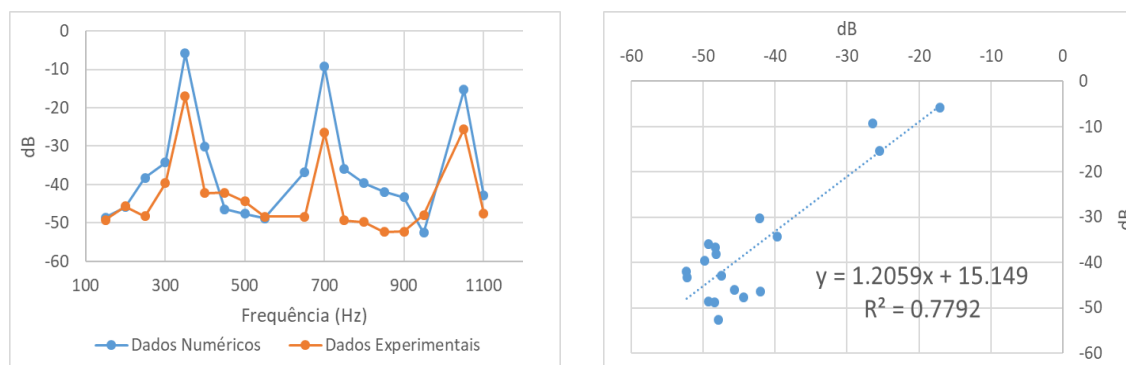


Figura 4.30 Gráficos de comparação (à esquerda) e correlação (à direita) entre os dados numéricos e experimentais para uma velocidade de 3000 rpm, T=80°C e EV ON

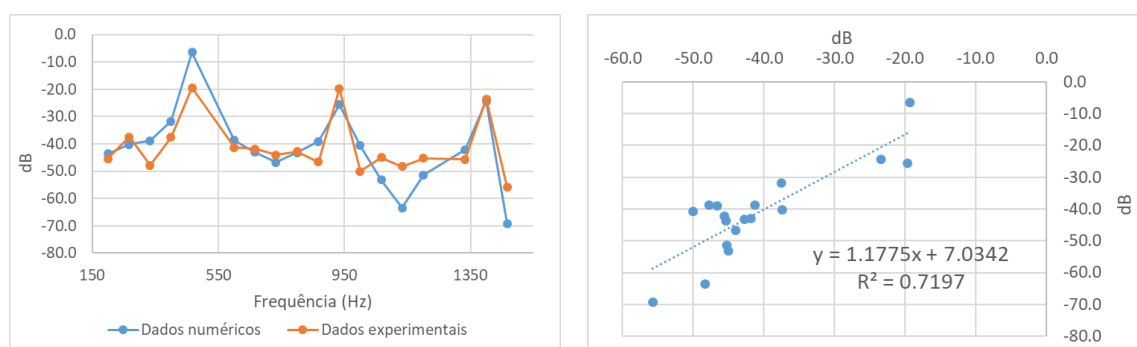


Figura 4.31 Gráficos de comparação (à esquerda) e correlação (à direita) entre os dados numéricos e experimentais para uma velocidade de 4000 rpm, T=80°C e EV OFF

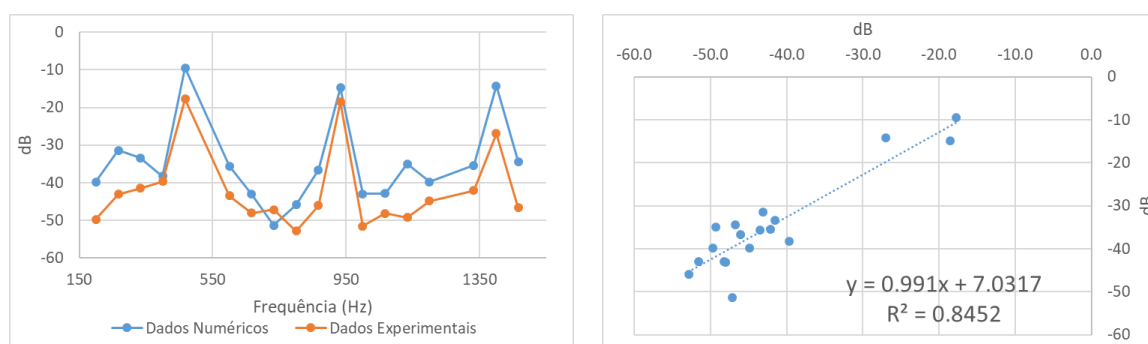


Figura 4.32 Gráficos de comparação (à esquerda) e correlação (à direita) entre os dados numéricos e experimentais para uma velocidade de 4000 rpm, T=80°C e EV ON

Analisando os gráficos apresentados nas figuras acima, constata-se que o valor mais baixo de correlação ocorre nas 2200 rpm com a electroválvula no modo de configuração OFF, tendo um valor aproximado de 0.69. O valor mais alto de correlação é cerca de 0.85 e ocorre no gráfico correspondente às 4000 rpm com a electroválvula a ON. A média dos valores de correlação é sensivelmente 0.76.

Se o modelo simulasse uma situação estrutural os valores de correlação acima apresentados não seriam satisfatórios. No entanto, como se trata de uma simulação de ruído, é possível concluir que para a gama de frequências escolhida os valores de correlação são razoáveis. A Figura 4.33 apresenta em síntese o nível de correlação para cada caso estudado. No anexo 7.5 estão ainda presentes os valores de desvio padrão dos valores experimentais retirados do LMS para cada frequência usada na comparação realizada. Apesar da maioria dos desvios terem valores baixos (abaixo de 3), existem algumas frequências que apresentam valores um pouco altos (acima de 6), o que leva a crer que a amostra de bombas H4 utilizada deveria ser ligeiramente maior.

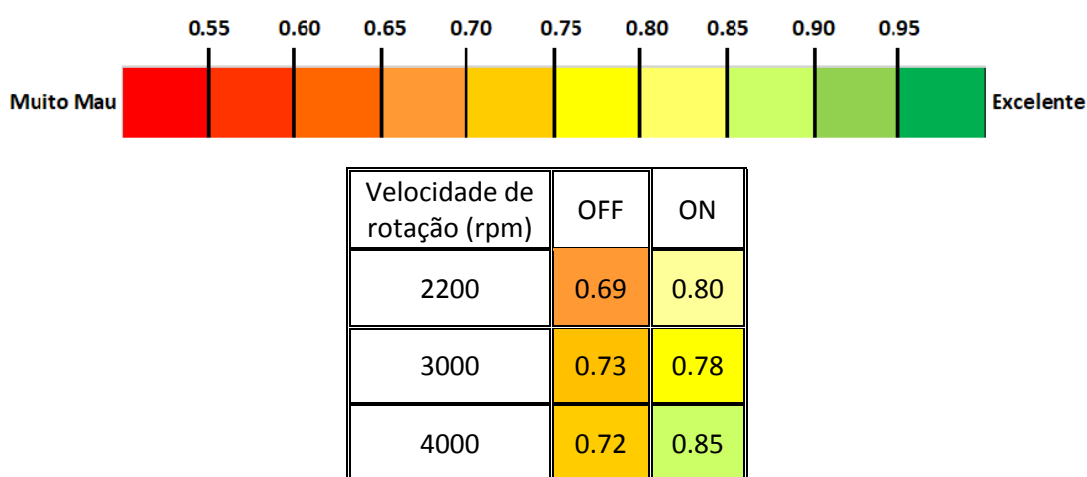


Figura 4.33 Síntese dos resultados dos valores de correlação

Olhando para os gráficos de comparação entre os dados numéricos e experimentais é possível verificar que o valor de ruído nos harmónicos é sempre maior no caso numérico do que no experimental, à exceção do caso relativo às 4000 rpm com a electroválvula no modo OFF. Isto significa que a amplitude da onda sinusoidal com frequência igual à frequência da pulsação de pressão é menor no caso experimental. No modelo numérico as fugas de óleo que ocorrem dentro dos componentes da bomba estão parametrizadas para os valores a que estas podem ocorrer, o que é difícil de acontecer na realidade. Deste modo, esta parametrização poderá interferir no valor do ruído presente nos harmónicos simulados pelo modelo numérico.

Por fim, fazendo uma análise aos valores de correlação, nota-se que a correlação é melhor no modo de configuração ON da electroválvula do que no modo OFF. Esta ocorrência pode ser explicada pelo facto de a simulação ser mais complexa quando a EV está OFF do que ON. Ou seja, quando a bomba trabalha com a electroválvula a ON, a fuga do óleo (para regular a pressão) na câmara de regulação dá-se apenas por um furo que está presente na mesma. No caso de a electroválvula estar OFF a fuga de óleo presente na câmara de regulação é controlada pelo clapet, que é um sistema mais complexo do que um simples furo, portanto é mais propício a que haja uma maior diferença entre os valores numéricos e experimentais.

Apesar de os valores de correlação apresentados estarem razoáveis, é possível ainda realizar uma melhoria dos mesmos. Com esse efeito e com base nas observações realizadas na

análise dos resultados da correlação apresentam-se as seguintes propostas de melhoria relativas ao modelo numérico:

- Otimização das fugas internas da bomba presentes no modelo:
 - Entre a parte lateral das palhetas e o rotor;
 - Entre o topo das palhetas e o estator;
 - Entre o rotor e o veio;
- Otimização do método de regulação de pressão no modo configuração OFF da electroválvula.

Relativamente à análise experimental sugere-se:

- Realização dos ensaios numa amostra maior de bombas de óleo;
- Comparação entre o ruído provocado pelas bombas montadas em diferentes dias e por diferentes operadores, com o intuito de perceber que efeito é que a montagem tem no ruído das bombas.

4.5.3 Matlab vs LMS

Uma vez que o processo de processamento dos dados experimentais usando o LMS é bastante demorado, decidiu-se criar um novo script de Matlab. Este tem o objetivo de automatizar todo o tratamento que a pulsação de sinal exige e retirar todos os pontos relevantes para comparação com os dados numéricos. Apesar de ainda ser uma versão primitiva daquilo que poderá ser a sua versão final, em anexo está presente o código criado com base nas referências (48), (49), (50) e (51).

Com o intuito de validar o tratamento que é efetuado pelo código criado, decidiu-se comparar os valores retirados pelo mesmo com os valores retirados em LMS. Assim, apresentam-se de seguida os resultados obtidos.

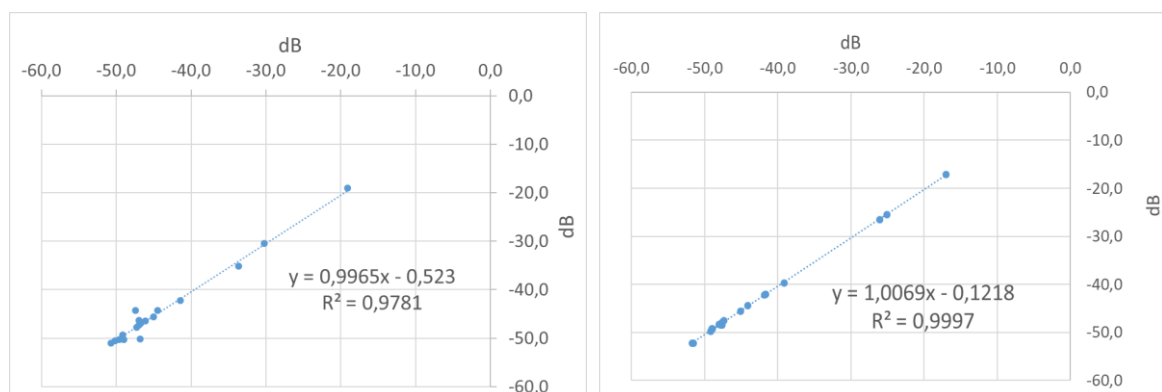


Figura 4.34 Gráfico de correlação entre os dados experimentais tratados em LMS e Matlab: 2200 rpm, T=80°C, EV OFF (à esquerda) e 3000 rpm, T=80°C, EV ON (à direita)

Observando os gráficos da Figura 4.34, têm-se valores de correlação de 0,98 e 0,99 para as condições testadas. Pode-se assim concluir que o código Matlab é válido para efetuar o tratamento dos dados experimentais, pois os valores de correlação são muito bons.

5 Conclusões e trabalhos futuros

5.1 Conclusões

Com o desenvolvimento da indústria automóvel e o aumento da competição entre as entidades que estão presentes no ramo, torna-se imprescindível que os veículos tenham uma maior fiabilidade para o consumidor, bem como um maior conforto. Desta forma, as vibrações e ruído têm, cada vez mais, um papel importante na conceção dos automóveis e seus componentes. Como já foi referido anteriormente, ao longo dos anos a existência de modelos de simulação válidos é bastante importante na medida em que os prazos de entrega de estudos ou protótipos são cada vez mais apertados. Posto isto, o objetivo deste trabalho foi verificar a correlação entre os dados numéricos e experimentais do ruído com origem no fluido que ocorre numa bomba de óleo de cilindrada variável fabricada na Renault-Cacia, numa tentativa de o validar ou posteriormente otimizar.

Numa primeira fase da análise decidiu-se fazer um primeiro estudo para verificar que diferenças é que poderiam ocorrer na aplicação do tratamento realizado por diferentes softwares (o LMS e o GT-Suite). Depois de se fazerem os gráficos de comparação e de correlação entre os dados tratados por ambos os softwares, chegou-se à conclusão que a diferença é pequena e sempre constante ao longo do espectro da frequência. Portanto, a utilização de diferentes softwares tem pouca influência no valor do sinal resultante do tratamento realizado pelos mesmos.

O segundo estudo que se realizou teve incidência na comparação entre os valores da frequência dos harmónicos teóricos e numéricos. Após a observação e análise do gráfico resultante, concluiu-se que existe uma correlação bastante boa entre estes. Mais tarde, após a realização dos ensaios, também se verificou que o valor na frequência dos harmónicos do sinal experimental também é coincidente com os dois anteriores. Assim, pode-se afirmar que nesta parte o modelo traduz bastante bem aquilo que ocorre na realidade e, portanto, é válido relativamente ao valor da frequência nos harmónicos.

De seguida analisou-se o sinal numérico ao longo da velocidade de rotação da bomba e ao longo do espectro da frequência onde se compararam sinais com diferentes temperaturas (20°C e 80°C) e modos de configuração da electroválvula (ON e OFF). Com base nas observações dos gráficos que contêm os dados numéricos resultantes da simulação efetuada com as diferentes condições já referidas anteriormente, é possível concluir que, segundo o modelo numérico, o ruído nos harmónicos ao longo da velocidade de rotação da bomba analisada tem um comportamento crescente e linear até cerca das 2200 rpm. Depois desta velocidade torna-se difícil arranjar um padrão para o seu comportamento na medida em que este depende mais das condições a que a bomba está sujeita. Relativamente ao comportamento ao longo do espectro é possível concluir que, segundo o modelo, tal como ao longo da velocidade de rotação, não ocorre nenhum padrão relativamente à influência da temperatura ou modo de configuração da electroválvula no ruído.

Por fim, depois de realizados os ensaios, efetuou-se o estudo da correlação existente entre os dados numéricos e experimentais. Na gama de frequências estudadas, e uma vez que se trata de ruído, verificou-se que ocorre uma correspondência razoável entre os dois, com valores entre 0.69 e 0.85 de correlação. Verificou-se ainda que o valor dos harmónicos numéricos é quase sempre

superior aos experimentais e que os resultados foram melhores quando a electroválvula se encontra no modo de configuração ON do que em OFF.

5.2 Trabalhos futuros

Tendo em conta os resultados apresentados e apesar de estes estarem razoáveis é possível otimizar o modelo, no sentido de ocorrer uma melhor correlação entre os resultados experimentais e numéricos. Posto isto, tendo em conta as conclusões da análise realizada propõem-se os seguintes trabalhos a realizar futuramente:

- Otimização do modelo tendo em conta as sugestões propostas no ponto 4.5.2
- Realização de novos ensaios tendo em conta também as sugestões realizadas anteriormente;
- Melhoramento do código de Matlab no anexo 7.6:
 - Incorporação no código a possibilidade de efetuar o tratamento do sinal de simulação numérica;
 - Verificação da correlação dos valores numéricos com os experimentais usando o código Matlab, deixando-se assim a necessidade de utilizar o Excel;
 - Conceção de uma *graphical user interface* que aceite os ficheiros de pulsação numéricos e experimentais e crie os gráficos de comparação e correlação entre os dados numéricos e experimentais.
- Verificação da correlação entre os novos dados após a realização dos pontos anteriores.

6 Referências

1. Services FP. The History of Pumps [Internet]. [citado 9 de Junho de 2017]. Disponível em: <http://www.foundationpumps.com.au/blog/history-pumps/>
2. Renault. Renault Group [Internet]. [citado 27 de Maio de 2017]. Disponível em: <https://group.renault.com/en/passion-2/heritage/#1900-1890>
3. Lubrita. How The Lubrication System Works In An Engine? [Internet]. [citado 27 de Fevereiro de 2017]. Disponível em: <http://www.lubrita.com/news/78/671/How-The-Lubrication-System-Works-In-An-Engine/>
4. Martins J. Motores de combustão interna. IV. Publindústria; 2013.
5. Renault. Politique Technique - POMPE A HUILE. 2011;
6. Omera O. Pumps & Turbines (Turbo-machines) [Internet]. 2014 [citado 18 de Fevereiro de 2017]. Disponível em: <https://www.slideshare.net/omerfaizkhan1/7117897-pumpsturbines>
7. Wiki I. Pumps [Internet]. [citado 1 de Março de 2017]. Disponível em: <https://www.myodesie.com/wiki/index/returnEntry/id/2960>
8. EnggCyclopedia. Pump Cavitation Causes [Internet]. [citado 1 de Março de 2017]. Disponível em: <http://www.enggcyclopedia.com/2011/11/pump-cavitation-causes/>
9. Britannica. Vane pump [Internet]. [citado 1 de Março de 2017]. Disponível em: <https://www.britannica.com/technology/vane-pump>
10. CHP. Les pompes hydrauliques [Internet]. [citado 20 de Fevereiro de 2017]. Disponível em: hydrauliqueportuaire.fr/documentation/les_pompes.pdf
11. Caradvice. Renault's new 'Energy dCi 130' Diesel engine – derived from F1 Experience - Photos (1 of 6) [Internet]. [citado 25 de Fevereiro de 2017]. Disponível em: http://www.caradvice.com.au/118434/renaults-new-energy-dci-130-diesel-engine-derived-from-f1-experience/11453_1_5.aspx
12. Mahle. MAHLE Group | MAHLE chronicle [Internet]. [citado 27 de Fevereiro de 2017]. Disponível em: http://www.mahle.com/mahle/en/about-mahle/mahle_chronicle_/
13. Mahle. MAHLE [Internet]. [citado 27 de Fevereiro de 2017]. Disponível em: <http://www.mahle.com/mahle/en/products-and-services/passenger-cars/oil-management/oil-pumps/>
14. SHW. SHW AG [Internet]. 2017 [citado 27 de Fevereiro de 2017]. Disponível em: <http://www.kms-wirkt.de>
15. SHW. SHW [Internet]. KMS GmbH & Co. KG <http://www.kms-wirkt.de>; 2017 [citado 27 de Fevereiro de 2017]. Disponível em: <http://www.shw.de/>
16. Hitachi. List of Products : Hitachi Automotive Systems, Ltd. [Internet]. [citado 27 de Fevereiro de 2017]. Disponível em: <http://www.hitachi-automotive.co.jp/en/products/ems/04.html>

17. Pierburg. PIERBURG: History [Internet]. [citado 1 de Março de 2017]. Disponível em: <http://www.pierburg-sa.es/en/about-us/history.html>
18. MarketsandMarkets. Automotive Pumps Market worth 57.50 Billion USD by 2021 [Internet]. [citado 1 de Março de 2017]. Disponível em: <http://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/automotive-pumps.asp>
19. Butcher L. Variable-displacement oil pumps [Internet]. 2014 [citado 22 de Fevereiro de 2017]. Disponível em: <https://www.highpowermedia.com/blog/3829/variable-displacement-oil-pumps>
20. Meira J, Filho A, Melo W, Ribeiro E. Strategies for Energy Savings with Use of Constant and Variable Oil Pump Systems. Em 2011 [citado 1 de Março de 2017]. Disponível em: <http://papers.sae.org/2011-36-0150/>
21. Batista JC dos S. Conceção de bomba de óleo de caudal ajustável para motores térmicos. UA; 2014.
22. Happian-Smith J. An introduction to Modern Vehicle Design. Em Heinenmann, Butterworth; 2002. p. 187–232.
23. Kelly SG. Mechanical Vibrations: Theory and Applications. SI. CENGAGE Learning; 2012.
24. Volkswagen. Noise, Vibration and Harshness. 2005;
25. Afshar. Optics: Part 1 – Introduction to waves | Physics classroom [Internet]. [citado 12 de Abril de 2017]. Disponível em: <https://afsharphysics.wordpress.com/optics/optics-part-1-introduction-to-waves/>
26. Nave R. Fundamental and Harmonic Resonances [Internet]. [citado 2 de Abril de 2017]. Disponível em: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Waves/funhar.html>
27. Kulkarni SR. Frequency Domain and Fourier Transforms. 2002;
28. Kojima E, Shinada M. Characteristics of Fluidborne Noise Generated by Fluid Power Pump. 1984.
29. Understanding how the ear works - Hearing Link [Internet]. [citado 2 de Abril de 2017]. Disponível em: <https://www.hearinglink.org/your-hearing/how-the-ear-works/>
30. Noise Chapter [Internet]. [citado 9 de Abril de 2017]. Disponível em: http://cfft.net/noise/noise_ch1b.shtml
31. MSC. Actran Acoustics [Internet]. [citado 2 de Abril de 2017]. Disponível em: <http://www.mscsoftware.com/product/actran-acoustics>
32. Brüel & Kjær. Vehicle NVH simulators [Internet]. [citado 2 de Abril de 2017]. Disponível em: <https://www.bksv.com/en/products/PULSE-analysis-software/vehicle-noise-vibration-and-harshness-software/vehicle-nvh-simulators-8601>
33. Siemens. LMS Imagine.Lab Amesim: Siemens PLM Software [Internet]. [citado 2 de Abril de 2017]. Disponível em: https://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/lms/imagine-lab/amesim/index.shtml

34. Abe T, Felice MJ. Driving the next generation of Powertrain NVH Refinement through Virtual Design. 2010;
35. Siemens. NX Nastran. 2014.
36. Gamma Technologies. Gamma Technologies | Engine and Vehicle simulation [Internet]. [citado 2 de Abril de 2017]. Disponível em: <https://www.gtisoft.com/>
37. Technologies G. Detailed Pumps and Compressors. 2015 [citado 9 de Junho de 2017]; Disponível em: <https://www.gtisoft.com/wp-content/uploads/2016/08/DetailedPumpsCompressorsBrochure.pdf>
38. Instruments N. Measuring Vibration with Accelerometers [Internet]. [citado 2 de Abril de 2017]. Disponível em: <http://www.ni.com/white-paper/3807/en/>
39. Instruments N. Measuring Sound with Microphones [Internet]. [citado 2 de Abril de 2017]. Disponível em: <http://www.ni.com/white-paper/14349/en/#toc2>
40. Tang C, Wang YS, Gao JH, Guo H. Fluid-sound coupling simulation and experimental validation for noise characteristics of a variable displacement external gear pump. Noise Control Eng J [Internet]. 2014; Disponível em: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84904003571&partnerID=tZOtx3y1>
41. Kim B, Lee K. Noise and Vibration of a Variable Displacement Vane Oil Pump for Passenger Car. 2011.
42. Lukic J. An approach to an NVH investigation of vehicle hydraulic pumps. 2011;
43. Ab Aziz SA, Mohd Sohaimi R, Pu'ad MH, Mohd Yaman MA. Noise, Vibration and Harshness (NVH) Study on Malaysian Armed Forces (MAF) Tactical Vehicle. Vol. 165, Applied Mechanics and Materials. 2012.
44. Siemens. LMS Test.Lab: Siemens PLM Software [Internet]. [citado 9 de Junho de 2017]. Disponível em: <https://www.plm.automation.siemens.com/en/products/lms/testing/test-lab/>
45. Renault. Documentação Renault.
46. Instruments N. What is Signal Conditioning [Internet]. [citado 9 de Junho de 2017]. Disponível em: <http://sine.ni.com/np/app/main/p/ap/daq/lang/pt/pg/1/sn/n17:daq,n21:11/fmid/2998/>
47. Siemens. LMS Test.Lab Signature Acquisition User manual. 2015.
48. Fast Fourier transform - MATLAB fft [Internet]. [citado 16 de Junho de 2017]. Disponível em: <http://www.mathworks.com/help/matlab/ref/fft.html?requestedDomain=fr.mathworks.com>
49. Getting wrong results with fft [Internet]. [citado 16 de Junho de 2017]. Disponível em: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/answers/116357-getting-wrong-results-with-fft>
50. Wrong amplitude values after the FFT [Internet]. [citado 16 de Junho de 2017]. Disponível em: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/answers/40887-wrong-amplitude-values-after-the-fft>

51. Find maximum in an interval of a vector - Stack Overflow [Internet]. [citado 16 de Junho de 2017]. Disponível em: <https://stackoverflow.com/questions/20262488/find-maximum-in-an-interval-of-a-vector>

7 Anexos

7.1 Código Matlab para conversão dos ficheiros

```

addpath ..\Ficheiros_a_converter\20_Off_Pressure1
addpath ..\Ficheiros_a_converter\20_On_Pressure1
addpath ..\Ficheiros_a_converter\80_Off_Pressure1
addpath ..\Ficheiros_a_converter\80_On_Pressure1
filenames={ '100_20_off.txt'; '750_20_off.txt'; '1000_20_off.txt';
            '1500_20_off.txt'; '2000_20_off.txt'; '2200_20_off.txt';
            '3000_20_off.txt'; '3500_20_off.txt'; '4000_20_off.txt';
            '4500_20_off.txt'; '5000_20_off.txt'; '5500_20_off.txt';
            '6000_20_off.txt'; '100_20_on.txt'; '750_20_on.txt';
            '1000_20_on.txt'; '1500_20_on.txt'; '2000_20_on.txt';
            '2200_20_on.txt'; '3000_20_on.txt'; '3500_20_on.txt';
            '4000_20_on.txt'; '4500_20_on.txt'; '5000_20_on.txt';
            '5500_20_on.txt'; '6000_20_on.txt'; '100_80_off.txt';
            '750_80_off.txt'; '1000_80_off.txt'; '1500_80_off.txt';
            '2000_80_off.txt'; '2200_80_off.txt'; '3000_80_off.txt';
            '3500_80_off.txt'; '4000_80_off.txt'; '4500_80_off.txt';
            '5000_80_off.txt'; '5500_80_off.txt'; '6000_80_off.txt';
            '100_80_on.txt'; '750_80_on.txt'; '1000_80_on.txt';
            '1500_80_on.txt'; '2000_80_on.txt'; '2200_80_on.txt';
            '3000_80_on.txt'; '3500_80_on.txt'; '4000_80_on.txt';
            '4500_80_on.txt'; '5000_80_on.txt'; '5500_80_on.txt';
            '6000_80_on.txt'};
for n=1:length(filenames)
    filename=filenames{n};
    name=filename(1:end-4);
    delimiterIn = ' ';
    headerlinesIn = 3;
    A = importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
    Signal.function_record.name=name;
    Signal.function_record.type='Signal';
    Signal.function_record.weighting='None';
    %Valores_x
    valores_x=A.data(:,1);
    Signal.x_values.start_value=valores_x(1);
    Signal.x_values.increment=0.00005;
    Signal.x_values.number_of_values=numel(valores_x);
    %quantity_x
    Signal.x_values.quantity.label = 's';
    %Valores_y
    Signal.y_values.values=A.data(:,2);
    %quantity_y
    Signal.y_values.quantity.label = 'bar';
    %%%ficheiro convertido
    save(name, 'Signal');
end

```

7.2 Tratamento de sinal no LMS

1º - Importação dos *add ins* necessários para importar o sinal:

- No menu superior, carregar em *Tools* → *Add ins*, e deverá aparecer a janela representada na Figura 7.1;
- Selecionar a *check box* correspondente ao *Data Block Editor* e clicar no OK.

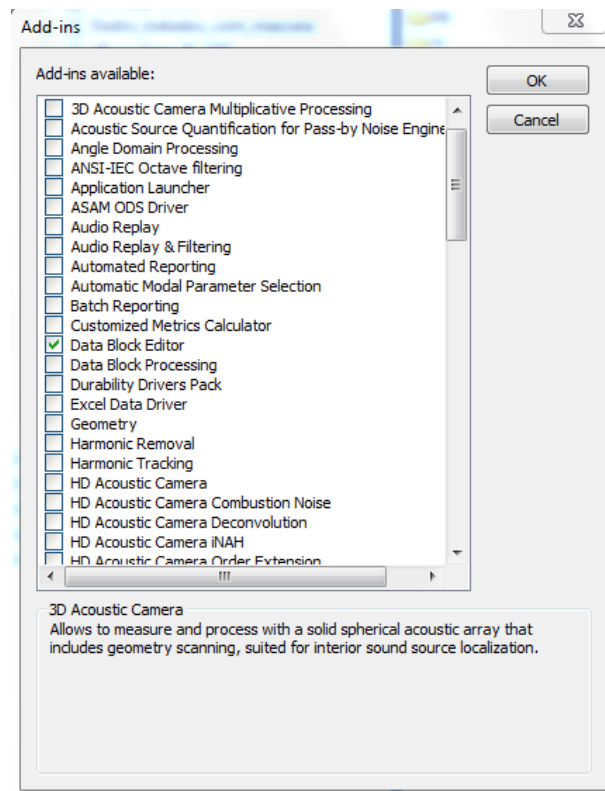
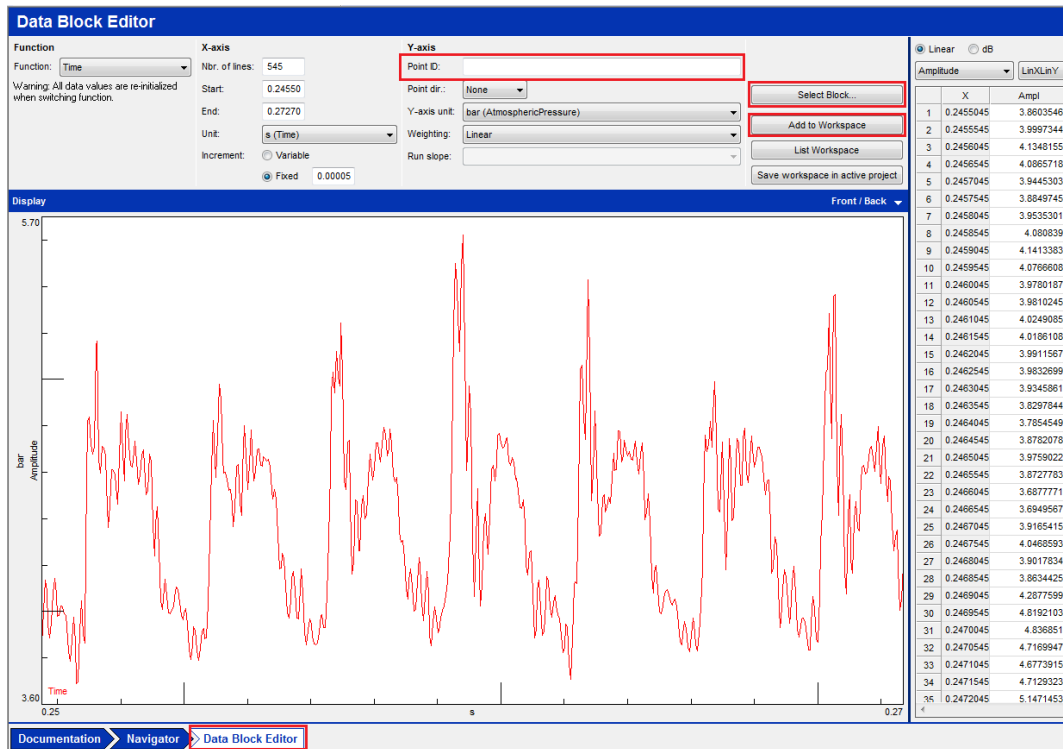


Figura 7.1 Janela de importação de *add ins*

2º - Visualização do sinal de pulsação de pressão:

- No menu inferior, seleccionar o *Data Block Editor*;
- Na janela do *Data Block Editor* (Figura 7.2), seleccionar *Select Block* e abrir o ficheiro pretendido;
- No *Point ID*, dar nome ao ficheiro do sinal de pressão em função do tempo de forma a ser mais fácil identificá-lo;
- Selecionar *Add to Workspace*;
- Repetir os 3 pontos anteriores para todos os ficheiros a tratar.

Figura 7.2 Janela do *Data Block Editor*

- No menu inferior, seleccionar o *Navigator* e a abrir a janela do *Data Calculator*;
- Seleccionar a pasta do *Workspace* e adicionar todos os ficheiros ao *Data Set* (Figura 7.3);

Data Set					
Adicionar ao Data set					
	Id	Name	Formula	Point id	Point Dir
5	F5	Time 2200 20 off		2200 20 off	None
6	F6	Time 2200 20 on		2200 20 on	None
7	F7	Time 2200 80 off		2200 80 off	None
8	F8	Time 2200 80 on		2200 80 on	None
9	F9	Time 4000 20 off		4000 20 off	None
10	F10	Time 4000 20 on		4000 20 on	None
11	F11	Time 4000 80 off		4000 80 off	None
12	F12	Time 4000 80 on		4000 80 on	None

Figura 7.3 *Data Set*

- Criar uma fórmula com a transformada de Fourier no *Active Formula Set (F)* e, usando o *Repeat for...* e seleccionando o *Calculate*, aplicá-la a todos os ficheiros presentes no *Data Set*;

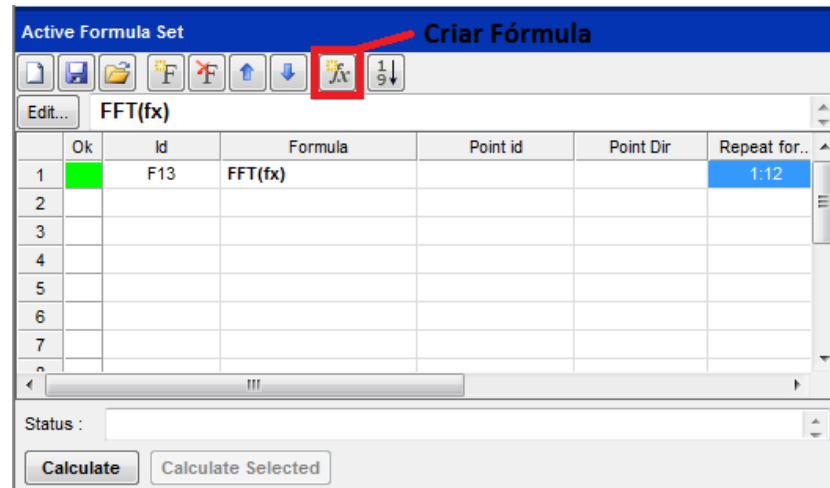
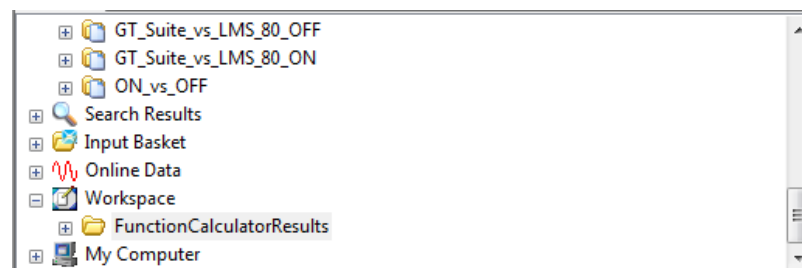


Figura 7.4 Active Formula Set

- Se os pontos anteriores forem realizados corretamente deverá aparecer uma pasta no *Workspace* com o nome “*FunctionCalculatorResults*”. Esta deverá conter todos os ficheiros da amplitude do sinal em função da frequência.

Figura 7.5 Pasta no *Workspace* com o nome “*FuntionCalculatorResults*”

4º -Visualização da amplitude do sinal em função da frequência

- No menu superior, seleccionar *Data* → *New Section*, para criar uma nova secção;
- No *Workspace*, abrir a pasta “*FunctionCalculatorResults*” e copiar o conteúdo para a nova secção;
- Criar uma figura usando a opção *FrontBack*, e arrastar o ficheiro da amplitude do sinal para figura;
- Deverá aparecer o gráfico da amplitude do sinal em função da frequência (Figura 4.3);
- Repetir os 3 pontos anteriores para todos os sinais.

5º - Transformação do sinal para decibéis:

- Na figura que contém o gráfico da amplitude do sinal, carregar com o botão do lado direito na zona do eixo dos yy e seleccionar *Format* → *dB/Level*;
- Aparecerá então o gráfico do ruído em função da frequência (Figura 4.4);
- Repetir estes passos para os restantes sinais.

6º - Outras funcionalidades importantes:

- Escolha dos limites no eixo da frequência:
 - Carregar no botão do lado direito do rato na zona do eixo e seleccionar *Limits* → *Fixed*.
- Ver valor de ruído nos harmónicos:
 - Carregar no botão do lado direito do rato na zona do gráfico e seleccionar *Add Automatic Cursor* → *Peak*;
 - Seleccionar no gráfico a região do harmónico.

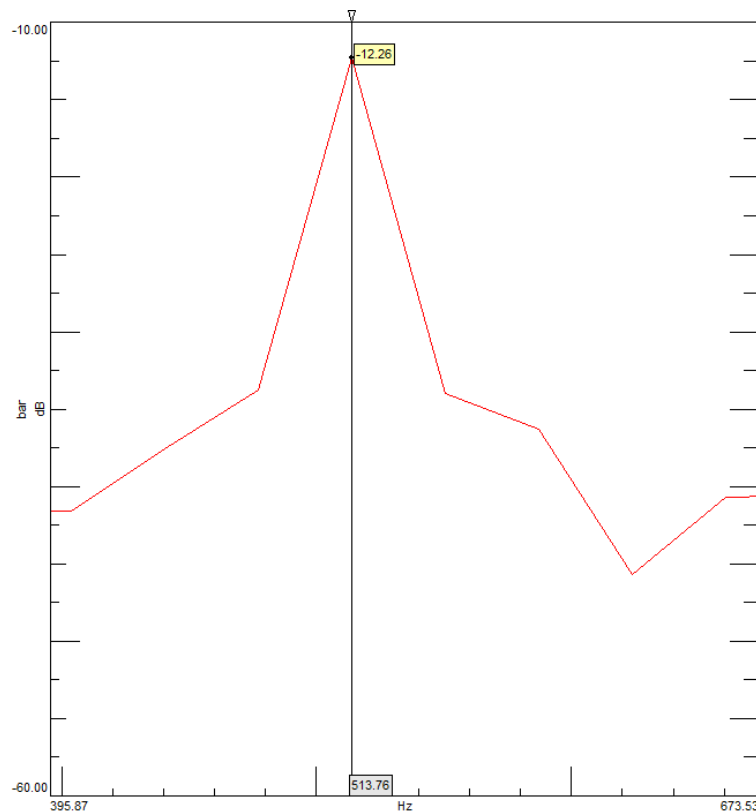


Figura 7.6 Valor de ruído no segundo harmónico a 2200 rpm, com T=20°C e EV OFF

7.3 Tabelas de valores dos dados num

Tabela 7.1 Harmónicos teóricos vs. harmónicos numéricos

2200 RPM		
Nº do harmónico	Harmónicos numéricos (LMS) (Hz)	Harmónicos Teóricos (equação 3.2) (Hz)
1	256.88	256.67
2	513.76	513.33
3	770.64	770.00
4	1027.52	1026.67
5	1284.40	1283.33
6	1541.28	1540.00
7	1798.17	1796.67
8	2055.05	2053.33
9	2311.93	2310.00
10	2568.81	2566.67
11	2825.96	2823.33
12	3082.57	3080.00

Tabela 7.2 Valores de ruído numéricos para T=20°C, EV OFF e 1º Harmónico

RPM	Freq (Hz)	GT-Suite (dB)	LMS (dB)
100	11.67	-58.84	-55.83
750	87.50	-32.28	-29.27
1000	116.67	-28.09	-25.10
1500	175.00	-22.24	-19.55
2000	233.33	-18.76	-15.70
2200	256.67	-16.93	-13.79
3000	350.00	-6.42	-3.41
3500	408.33	-5.86	-2.85
4000	466.67	-7.78	-4.78
4500	525.00	-10.71	-7.67
5000	583.33	-11.85	-8.88
5500	641.67	-10.65	-7.62
6000	700.00	-15.70	-12.61

Tabela 7.3 Valores de ruído numéricos para T=20°C, EV OFF, 2º Harmónico

RPM	Freq (Hz)	GT-Suite (dB)	LMS (dB)
100	23.34		
750	175.00	-27.48	-24.45
1000	233.34	-23.68	-20.67
1500	350.00	-15.79	-12.94
2000	466.66	-14.52	-11.47
2200	513.34	-15.40	-12.26
3000	700.00	-11.41	-8.41
3500	816.66	-17.36	-14.39
4000	933.34	-24.87	-21.88
4500	1050.00	-17.88	-14.73
5000	1166.66	-17.87	-14.96
5500	1283.34	-10.90	-7.90
6000	1400.00	-15.78	-12.85

Tabela 7.4 Valores de ruído numéricos para T=20°C, EV ON e 1º Harmónico

RPM	Freq (Hz)	GT-Suite (dB)	LMS (dB)
100	11.67	-59.48	-56.48
750	87.50	-33.23	-30.56
1000	116.67	-29.73	-26.81
1500	175.00	-25.29	-22.28
2000	233.33	-21.27	-18.16
2200	256.67	-19.11	-16.10
3000	350.00	-17.80	-14.79
3500	408.33	-15.38	-12.37
4000	466.67	-12.16	-9.15
4500	525.00	-7.20	-4.19
5000	583.33	-5.59	-2.61
5500	641.67	-4.54	-1.53
6000	700.00	-5.94	-2.70

Tabela 7.5 Valores de ruído numéricos para T=20°C, EV ON e 2º Harmónico

RPM	Freq (Hz)	GT-Suite (dB)	LMS (dB)
100			
750	175.00	-30.33	-27.67
1000	233.34	-26.86	-23.93
1500	350.00	-18.64	-15.55
2000	466.66	-18.25	-15.24
2200	513.34	-18.60	-15.58
3000	700.00	-23.94	-20.91
3500	816.66	-23.13	-20.01
4000	933.34	-17.94	-14.95
4500	1050.00	-15.11	-12.05
5000	1166.66	-9.93	-6.85
5500	1283.34	-10.99	-7.91
6000	1400.00	-12.76	-9.85

Tabela 7.6 Valores de ruído para T=80°C, EV OFF, e 1º Harmónico

RPM	Freq (Hz)	GT-Suite (dB)	LMS (dB)
100	11.67	-60.15	-57.15
750	87.50	-26.38	-23.38
1000	116.67	-21.69	-18.67
1500	175.00	-16.04	-13.04
2000	233.33	-12.64	-9.63
2200	256.67	-11.87	-8.87
3000	350.00	-11.35	-8.34
3500	408.33	-8.51	-5.48
4000	466.67	-9.49	-6.47
4500	525.00	-11.10	-7.65
5000	583.33	-13.37	-10.71
5500	641.67	-13.61	-10.80
6000	700.00	-7.90	-4.79

Tabela 7.7 Valores de ruído para T=80°C, EV OFF e 2º Harmónico

RPM	Freq (Hz)	GT-Suite (dB)	LMS (dB)
100	23.34		
750	175.00	-24.28	-21.28
1000	233.34	-22.08	-19.04
1500	350.00	-14.41	-11.41
2000	466.66	-12.69	-9.68
2200	513.34	-17.94	-14.87
3000	700.00	-14.90	-11.90
3500	816.66	-16.12	-13.13
4000	933.34	-28.48	-25.54
4500	1050.00	-22.98	-19.83
5000	1166.66	-21.69	-18.92
5500	1283.34	-19.36	-16.20
6000	1400.00	-12.00	-9.19

Tabela 7.8 Valores de ruído numéricos para T=80°C, EV ON e 1º Harmónico

RPM	Freq (Hz)	GT-Suite (dB)	LMS (dB)
100	11.67	-66.83	-63.82
750	87.50	-33.83	-30.79
1000	116.67	-30.13	-27.06
1500	175.00	-23.47	-20.43
2000	233.33	-22.15	-19.02
2200	256.67	-18.47	-15.45
3000	350.00	-8.83	-5.83
3500	408.33	-6.99	-4.01
4000	466.67	-12.48	-9.47
4500	525.00	-13.53	-10.78
5000	583.33	-15.48	-12.50
5500	641.67	-12.55	-9.51
6000	700.00	-14.59	-11.58

Tabela 7.9 Valores de ruído numéricos para T=80°C, EV ON e 2º Harmónico

RPM	Freq (Hz)	GT-Suite (dB)	LMS (dB)
100	11.67		
750	87.50	-30.75	-27.72
1000	116.67	-24.91	-21.84
1500	175.00	-18.06	-15.07
2000	233.33	-16.30	-13.20
2200	256.67	-18.75	-15.75
3000	350.00	-12.28	-9.25
3500	408.33	-15.00	-12.04
4000	466.67	-17.74	-14.73
4500	525.00	-17.50	-14.51
5000	583.33	-16.30	-13.26
5500	641.67	-16.72	-13.75
6000	700.00	-20.81	-17.82

Tabela 7.10 Valores de ruído numéricos para 2200 RPM e T=20°C

Harmónico	Frequência (Hz)	ON (dB)	OFF (dB)
1	256.67	-16.10	-13.79
2	513.33	-15.58	-12.26
3	770.00	-18.59	-15.44
4	1026.67	-19.38	-17.14
5	1283.33	-19.97	-18.54
6	1540.00	-17.19	-19.03
7	1796.67	-11.15	-18.50
8	2053.33	-8.84	-18.87
9	2310.00	-12.67	-17.15
10	2566.67	-14.64	-9.05
11	2823.33	-15.82	-6.90
12	3080.00	-20.90	-7.84

Tabela 7.11 Valores de ruído numéricos para 2200 RPM e T=80°C

Harmónico	Frequência (Hz)	ON (dB)	OFF (dB)
1	256.67	-15.45	-8.87
2	513.33	-15.75	-14.87
3	770.00	-18.78	-14.52
4	1026.67	-22.07	-18.03
5	1283.33	-22.21	-25.90
6	1540.00	-23.72	-28.79
7	1796.67	-22.95	-32.19
8	2053.33	-6.60	-37.45
9	2310.00	-9.82	-36.53
10	2566.67	-14.53	-37.13
11	2823.33	-16.63	-40.43
12	3080.00	-23.75	-36.79

Tabela 7.12 Valores de ruído numéricos para 3000 RPM e T=20°C

Harmónico	Frequência (Hz)	ON (dB)	OFF (dB)
1	350.00	-3.41	-14.79
2	700.00	-20.91	-8.41
3	1050.00	-11.10	-18.01
4	1400.00	-18.76	-22.33
5	1750.00	-30.71	-26.32
6	2100.00	-26.18	-31.21
7	2450.00	-36.06	-19.60
8	2800.00	-51.41	-19.01
9	3150.00	-47.67	-24.86

Tabela 7.13 Valores de ruído numéricos para 3000 RPM e T=80°C

Harmónico	Frequência (Hz)	ON (dB)	OFF (dB)
1	350.00	-5.83	-8.34
2	700.00	-9.25	-11.90
3	1050.00	-15.37	-25.72
4	1400.00	-19.06	-23.46
5	1750.00	-21.35	-28.36
6	2100.00	-9.50	-33.83
7	2450.00	-10.73	-34.25
8	2800.00	-15.42	-30.14
9	3150.00	-13.97	-35.94

Tabela 7.14 Valores de ruído numéricos para 4000 RPM e T=20°C

Harmónico	Frequência (Hz)	ON (dB)	OFF (dB)
1	466.67	-9.47	-6.47
2	933.33	-14.73	-25.54
3	1400.00	-14.21	-24.32
4	1866.67	-25.12	-26.87
5	2333.33	-26.78	-23.38
6	2800.00	-24.67	-19.82
7	3266.67	-38.16	-16.23

Tabela 7.15 Valores de ruído numéricos para 4000 RPM e T=80°C

Harmónico	Frequência (Hz)	ON (dB)	OFF (dB)
1	466.67	-9.15	-4.78
2	933.33	-14.95	-21.88
3	1400.00	-3.47	-26.56
4	1866.67	-13.23	-19.94
5	2333.33	-20.98	-21.16
6	2800.00	-18.28	-21.00
7	3266.67	-26.54	-25.56

7.4 Gráficos de comparação entre o GT-Suite e o LMS

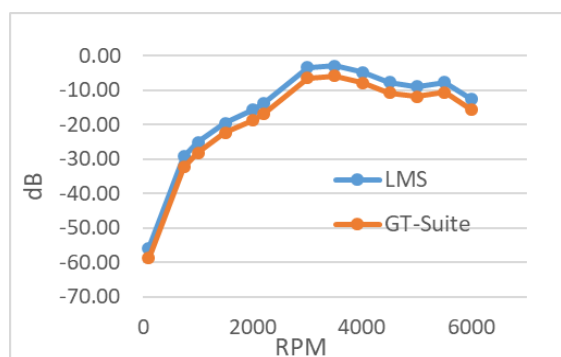


Figura 7.7 GT-Suite vs. LMS (T=20°C, EV OFF, 1º Harmónico)

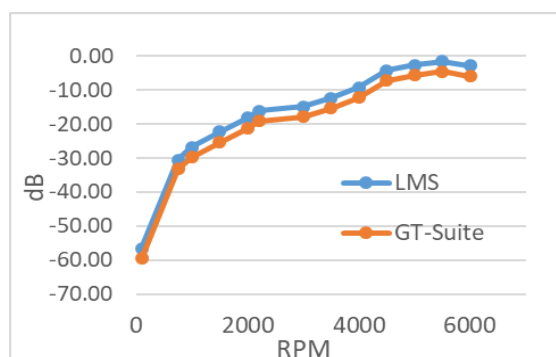


Figura 7.8 GT-Suite vs. LMS (T=20°C, EV ON, 1º Harmónico)

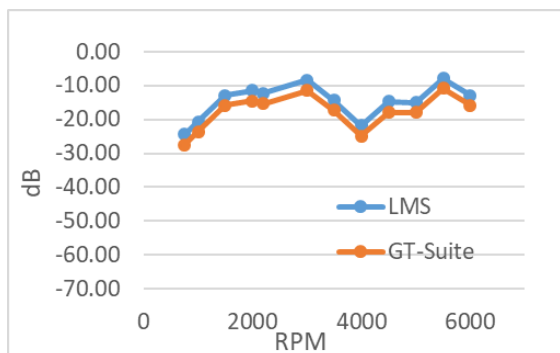


Figura 7.9 GT-Suite vs. LMS (T=20°C, EV OFF, 2º Harmónico)

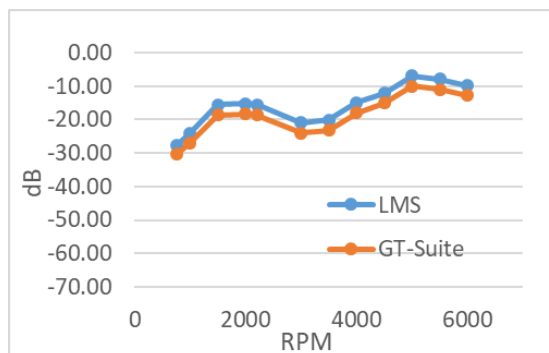


Figura 7.10 GT-Suite vs. LMS (T=20°C, EV ON, 2º Harmónico)

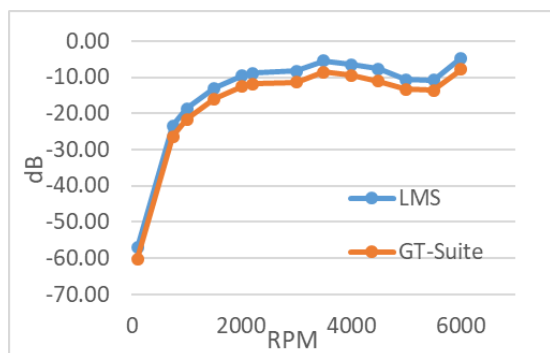


Figura 7.11 GT-Suite vs. LMS (T=80°C, EV OFF, 1º Harmónico)

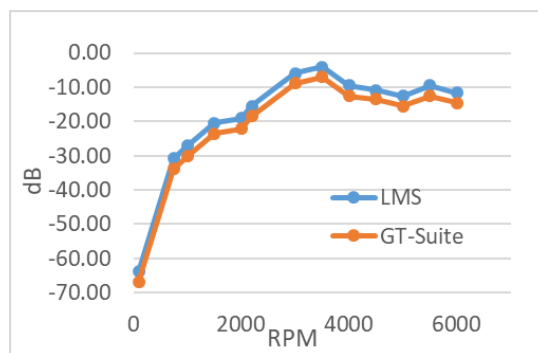


Figura 7.12 GT-Suite vs. LMS (T=80°C, EV ON, 1º Harmónico)



Figura 7.13 GT-Suite vs. LMS (T=80°C, EV OFF, 2º Harmónico)

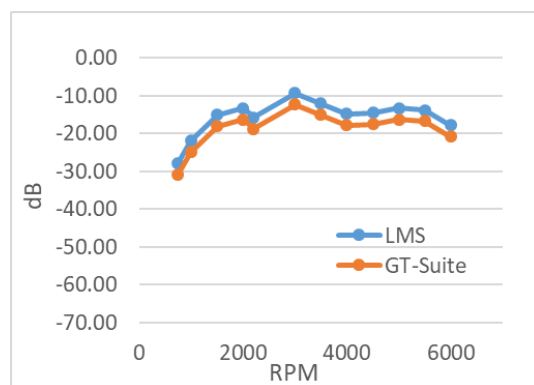


Figura 7.14 GT-Suite vs. LMS (T=80°C, EV ON, 2º Harmónico)

7.5 Tabelas de valores da correlação e correspondente gráfico no LMS

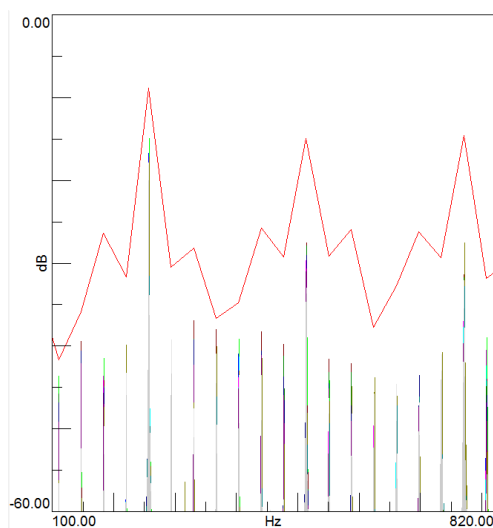


Figura 7.15 Gráfico no LMS dos dados experimentais e numéricos: 2200 rpm, EV OFF, T=80°C

Tabela 7.16 Valores de ruído para 2200 rpm, EV OFF, T=80°C

2200 rpm OFF									
Frequência (Hz)	Nº de ensaio	Bomba 1	Bomba 2	Bomba 3	Bomba 4	Média	Média Total	Desvio Padrão	Numérico (dB)
110	Medida 1	-47.90	-46.84	-56.22	-52.98	-51.0	-50.3	4.3	-41.6
	Medida 2	-49.07	-45.82	-57.02	-46.18	-49.5			
	Medida 3	-48.49	-49.19	-56.62	-46.9	-50.3			
	Medida 4	-43.62	-47.51	-57.91	-52.16	-50.3			
147	Medida 1	-41.23	-39.45	-53.28	-41.69	-43.9	-45.6	4.7	-35.8
	Medida 2	-45.31	-40.90	-54.81	-46.59	-46.9			
	Medida 3	-44.58	-40.63	-52.50	-45.31	-45.8			
	Medida 4	-45.83	-42.12	-52.41	-43.34	-45.9			
183	Medida 1	-41.48	-45.70	-53.14	-43.93	-46.1	-46.9	3.1	-26.4
	Medida 2	-43.67	-45.11	-49.76	-49.48	-47.0			
	Medida 3	-45.11	-44.20	-52.70	-49.42	-47.9			
	Medida 4	-46.83	-44.86	-47.40	-48.34	-46.9			
220	Medida 1	-43.00	-53.61	-39.85	-40.2	-44.2	-46.3	6.8	-31.6
	Medida 2	-43.69	-57.66	-43.28	-43.22	-47.0			
	Medida 3	-31.61	-55.91	-45.94	-43.2	-44.2			
	Medida 4	-48.02	-58.93	-49.08	-43.85	-50.0			
256.66	Medida 1	-14.87	-21.80	-17.19	-20.66	-18.6	-19.1	2.1	-8.9
	Medida 2	-16.74	-19.93	-17.85	-20.23	-18.7			
	Medida 3	-19.85	-18.48	-20.03	-19.76	-19.5			
	Medida 4	-17.98	-19.07	-24.20	-17.01	-19.6			

294	Medida 1	-46.97	-45.15	-43.40	-48.9	-46.1	-48.1	4.6	-30.5
	Medida 2	-47.94	-47.44	-39.22	-52.73	-46.8			
	Medida 3	-52.99	-47.59	-40.41	-51.32	-48.1			
	Medida 4	-52.96	-48.96	-44.93	-58.2	-51.3			
330	Medida 1	-45.51	-36.94	-51.02	-40.26	-43.4	-44.3	4.3	-28.2
	Medida 2	-45.15	-39.19	-47.54	-41.75	-43.4			
	Medida 3	-48.06	-39.27	-46.83	-44	-44.5			
	Medida 4	-50.93	-41.19	-51.03	-40.9	-46.0			
404	Medida 1	-39.13	-45.18	-42.99	-35.24	-40.6	-42.3	3.6	-34.8
	Medida 2	-41.32	-44.54	-43.53	-38.33	-41.9			
	Medida 3	-40.95	-43.72	-49.37	-38.73	-43.2			
	Medida 4	-43.54	-44.56	-48.41	-37.81	-43.6			
440	Medida 1	-54.49	-38.29	-41.50	-42.98	-44.3	-46.5	6.3	-25.7
	Medida 2	-58.42	-40.56	-43.57	-44.87	-46.9			
	Medida 3	-60.31	-40.63	-48.99	-44.03	-48.5			
	Medida 4	-52.35	-41.09	-49.01	-43.26	-46.4			
475	Medida 1	-50.84	-41.18	-51.87	-48.01	-48.0	-51.0	6.5	-29.3
	Medida 2	-52.36	-39.81	-58.56	-48.61	-49.8			
	Medida 3	-55.12	-43.77	-63.98	-47.95	-52.7			
	Medida 4	-54.40	-46.61	-62.70	-50.84	-53.6			
513.32	Medida 1	-29.16	-27.56	-36.48	-26.91	-30.0	-30.5	2.8	-14.9
	Medida 2	-29.69	-29.04	-33.67	-25.96	-29.6			
	Medida 3	-30.95	-31.40	-33.00	-30.36	-31.4			
	Medida 4	-33.51	-27.93	-33.67	-28.64	-30.9			
550	Medida 1	-44.16	-41.62	-46.67	-48.23	-45.2	-47.3	3.9	-29.1
	Medida 2	-46.83	-43.17	-46.34	-52.16	-47.1			
	Medida 3	-43.71	-44.53	-48.51	-57.22	-48.5			
	Medida 4	-45.05	-45.68	-48.18	-54.36	-48.3			
624	Medida 1	-49.63	-55.10	-43.80	-41.17	-47.4	-50.3	6.8	-37.3
	Medida 2	-51.25	-57.33	-48.84	-41.74	-49.8			
	Medida 3	-53.11	-62.90	-45.81	-44.08	-51.5			
	Medida 4	-51.23	-65.85	-49.72	-43.46	-52.6			
660	Medida 1	-53.04	-56.54	-46.04	-44.18	-50.0	-50.5	4.3	-32.7
	Medida 2	-50.55	-56.43	-47.18	-47.94	-50.5			
	Medida 3	-49.46	-58.80	-44.66	-47.61	-50.1			
	Medida 4	-52.53	-56.38	-49.13	-48.12	-51.5			
700	Medida 1	-56.76	-43.59	-50.33	-42.93	-48.4	-49.3	5.5	-26.2
	Medida 2	-55.30	-46.70	-46.15	-44.71	-48.2			
	Medida 3	-59.61	-48.16	-46.88	-46.06	-50.2			
	Medida 4	-62.34	-47.08	-46.83	-45.92	-50.5			

735	Medida 1	-46.44	-46.08	-40.80	-50.89	-46.1	-47.8	4.9	-28.8
	Medida 2	-47.92	-43.53	-42.03	-53.66	-46.8			
	Medida 3	-48.67	-47.09	-41.01	-58.05	-48.7			
	Medida 4	-49.06	-49.13	-43.02	-57.17	-49.6			
769.98	Medida 1	-32.86	-34.31	-27.52	-35.9	-32.6	-35.1	3.3	-14.5
	Medida 2	-35.62	-34.09	-32.81	-33.63	-34.0			
	Medida 3	-34.83	-35.19	-32.07	-38.93	-35.3			
	Medida 4	-35.14	-44.02	-35.48	-38.88	-38.4			
844	Medida 1	-53.24	-48.99	-49.01	-48.95	-50.0	-50.2	4.0	-29.9
	Medida 2	-55.66	-47.07	-44.80	-49.98	-49.4			
	Medida 3	-56.96	-49.20	-45.15	-52.44	-50.9			
	Medida 4	-56.37	-46.85	-43.99	-55.11	-50.6			

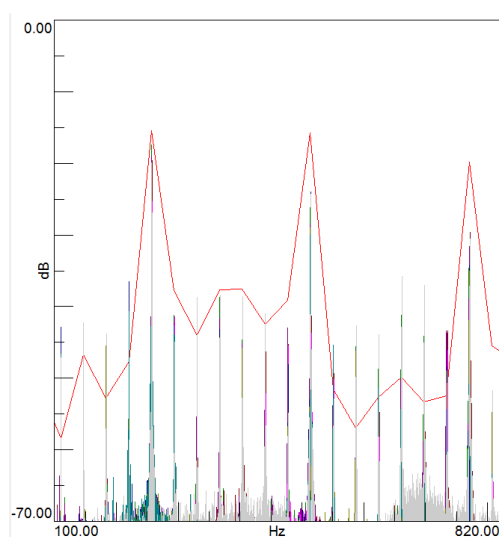


Figura 7.16 Gráfico no LMS dos dados experimentais e numéricos: 2200 rpm, EV ON, T=80°C

Tabela 7.17 Valores de ruído para 2200 rpm, EV ON, T=80°C

2200 rpm ON									
Frequência (Hz)	Nº de ensaio	Bomba 1	Bomba 2	Bomba 3	Bomba 4	Média	Média Total	Desvio Padrão	Numérico (dB)
110	Medida 1	-47.09	-49.2	-42.92	-44.53	-45.9	-47.5	1.92	-58.4
	Medida 2	-49.92	-48.85	-46.85	-45.95	-47.9			
	Medida 3	-49.2	-47.09	-47.67	-47.12	-47.8			
	Medida 4	-48.85	-49.92	-46.6		-48.5			
147	Medida 1	-50.43	-50.43	-44.76	-42.26	-47.0	-46.4	3.79	-46.7
	Medida 2	-46.5	-46.71	-47.39	-38.66	-44.8			
	Medida 3	-51.39	-47.97	-42.29	-40.97	-45.7			
	Medida 4	-47.97	-51.39	-45.58		-48.3			

183	Medida 1	-51.76	-46.96	-49.73	-43.04	-47.9	-48.3	3.58	-52.8
	Medida 2	-51.2	-47.16	-48.49	-43.81	-47.7			
	Medida 3	-46.96	-51.2	-45.53	-41.7	-46.3			
	Medida 4	-47.16	-51.76	-54.95		-51.3			
220	Medida 1	-52.89	-52.89	-36.54	-49.1	-47.9	-49.7	6.64	-47.3
	Medida 2	-53.35	-51.92	-39.38	-58.67	-50.8			
	Medida 3	-51.43	-51.43	-40.69	-59.71	-50.8			
	Medida 4	-51.92	-53.35	-42.21		-49.2			
256.66	Medida 1	-19.54	-14.64	-22.99	-19.45	-19.2	-19.1	2.74	-15.5
	Medida 2	-14.64	-19.54	-20.25	-19.93	-18.6			
	Medida 3	-17.42	-17.42	-25.38	-16.16	-19.1			
	Medida 4	-18.95	-18.95	-20.2		-19.4			
294	Medida 1	-39.19	-39.19	-41.43	-42.06	-40.5	-43.0	2.13	-37.8
	Medida 2	-42.39	-42.39	-44.18	-45.95	-43.7			
	Medida 3	-41.18	-41.18	-42.67	-44.97	-42.5			
	Medida 4	-44.94	-44.94	-45.68		-45.2			
330	Medida 1	-44.79	-44.79	-51.91	-38.68	-45.0	-45.0	6.48	-43.9
	Medida 2	-42.27	-41.37	-53.82	-36.24	-43.4			
	Medida 3	-41.37	-42.27	-55.73	-37.68	-44.3			
	Medida 4	-42.04	-42.04	-57.66		-47.2			
404	Medida 1	-39.37	-46.46	-46.76	-36.64	-42.3	-43.6	4.61	-37.5
	Medida 2	-45.12	-39.37	-43.64	-38.61	-41.7			
	Medida 3	-44.67	-45.12	-45.82	-34.52	-42.5			
	Medida 4	-46.46	-44.67	-53.07		-48.1			
440	Medida 1	-42.93	-42.93	-45.94	-38.72	-42.6	-43.8	4.28	-42.5
	Medida 2	-39.31	-39.31	-42.69	-40.95	-40.6			
	Medida 3	-42.85	-42.85	-54.17	-40.76	-45.2			
	Medida 4	-43.82	-43.82	-52.5		-46.7			
475	Medida 1	-42.94	-45.29	-45.53	-48.62	-45.6	-48.0	4.90	-39.1
	Medida 2	-43.69	-43.69	-48.11	-51.47	-46.7			
	Medida 3	-45.29	-42.94	-56.71	-54.85	-49.9			
	Medida 4	-45.65	-45.64	-58.21		-49.8			
513.32	Medida 1	-27.27	-27.27	-24.2	-25.11	-26.0	-26.4	1.89	-15.8
	Medida 2	-24.67	-24.67	-23.99	-24.27	-24.4			
	Medida 3	-26.15	-28.61	-29.04	-24.35	-27.0			
	Medida 4	-28.61	-26.15	-29.34		-28.0			
550	Medida 1	-43.86	-49.3	-45.39	-49.13	-46.9	-48.8	3.82	-51.5
	Medida 2	-49.3	-49.3	-50.23	-52.94	-50.4			
	Medida 3	-49.3	-43.86	-45.47	-53.79	-48.1			
	Medida 4	-45.45	-45.45	-57.73		-49.5			

624	Medida 1	-46.25	-49.25	-52.8	-41.9	-47.6	-49.1	3.24	-52.7
	Medida 2	-48.73	-48.73	-48.14	-43.95	-47.4			
	Medida 3	-50.84	-50.84	-50.85	-44.7	-49.3			
	Medida 4	-51.95	-51.95	-52.57		-52.2			
660	Medida 1	-42.08	-42.08	-46.73	-37.21	-42.0	-41.7	3.60	-49.8
	Medida 2	-44	-40.39	-44.52	-35.78	-41.2			
	Medida 3	-41.22	-41.22	-44.72	-33.83	-40.2			
	Medida 4	-40.39	-44	-46.17		-43.5			
700	Medida 1	-43.71	-43.71	-49.64	-35.99	-43.3	-45.7	6.16	-53.3
	Medida 2	-44.17	-42.93	-48.86	-36.99	-43.2			
	Medida 3	-42.93	-44.17	-50.5	-37.98	-43.9			
	Medida 4	-47.56	-47.56	-61.79		-52.3			
735	Medida 1	-43.43	-41.58	-49.08	-45.64	-44.9	-46.1	3.17	-52.5
	Medida 2	-41.58	-43.43	-48.4	-50.68	-46.0			
	Medida 3	-43.38	-47	-46.16	-52.1	-47.2			
	Medida 4	-46.74	-43.38	-48.94		-46.4			
769.98	Medida 1	-31.65	-29.63	-35.03	-32.16	-32.1	-32.7	2.95	-19.8
	Medida 2	-31.58	-31.65	-34.25	-30.52	-32.0			
	Medida 3	-29.63	-32.14	-33.31	-30.67	-31.4			
	Medida 4	-31.65	-31.58	-42.11		-35.1			
844	Medida 1	-43.01	-43.82	-58.8	-37	-45.7	-48.6	9.70	-47.6
	Medida 2	-43.82	-43.01	-54.71	-39.94	-45.4			
	Medida 3	-44.71	-44.71	-67.52	-42	-49.7			
	Medida 4	-45.1	-45.1	-70.91		-53.7			

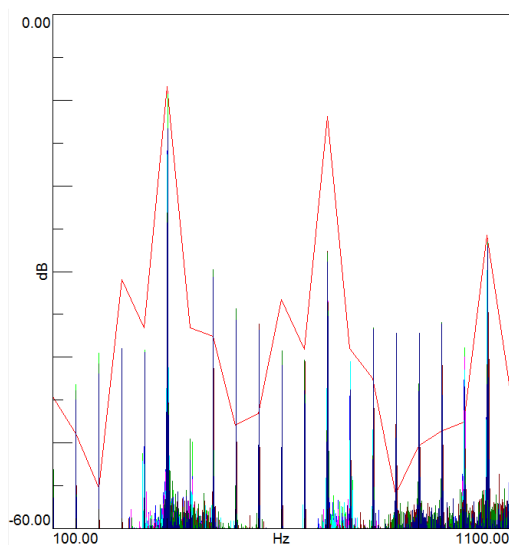


Figura 7.17 Gráfico no LMS dos dados experimentais e numéricos: 3000 rpm, EV OFF, T=80°C

Tabela 7.18 Valores de ruído para 3000 rpm, EV OFF, T=80°C

3000 rpm OFF									
Frequência (Hz)	Nº de ensaio	Bomba 1	Bomba 2	Bomba 3	Bomba 4	Média	Média Total	Desvio Padrão	Numérico (dB)
150	Medida 1	-43.2	-42.1	-48.2	-45.0	-44.6	-46.8	2.66	-48.9
	Medida 2	-48.1	-43.4	-50.5	-43.9	-46.5			
	Medida 3	-49.2	-46.8	-50.7	-45.4	-48.0			
	Medida 4	-49.6	-44.3	-52.1	-47.1	-48.3			
200	Medida 1	-39.5	-42.4	-48.4	-41.0	-42.8	-44.7	3.31	-55.2
	Medida 2	-43.4	-43.8	-50.0	-40.8	-44.5			
	Medida 3	-46.1	-42.0	-49.1	-42.0	-44.8			
	Medida 4	-46.4	-43.0	-53.2	-43.5	-46.5			
250	Medida 1		-42.1	-41.3	-39.0	-40.8	-43.0	2.10	-31.0
	Medida 2		-44.1	-44.2	-40.1	-42.8			
	Medida 3		-45.0	-46.0	-41.1	-44.0			
	Medida 4		-44.7	-47.0	-41.7	-44.5			
300	Medida 1	-39.2	-44.2	-33.5	-39.4	-39.1	-42.8	3.81	-36.3
	Medida 2	-44.3	-49.0	-37.0	-42.4	-43.2			
	Medida 3	-44.1	-50.2	-41.9	-40.6	-44.2			
	Medida 4	-45.2	-48.2	-43.5	-43.0	-45.0			
350	Medida 1	-9.3	-14.6	-17.8	-13.3	-13.8	-16.2	2.45	-8.3
	Medida 2	-15.9	-14.2	-18.5	-16.2	-16.2			
	Medida 3	-16.3	-15.9	-18.7	-16.3	-16.8			
	Medida 4	-16.2	-16.4	-22.4	-16.9	-18.0			
400	Medida 1	-51.8	-44.6	-33.5	-53.0	-45.7	-47.8	5.81	-36.6
	Medida 2	-54.0	-46.5	-37.5	-49.6	-46.9			
	Medida 3	-55.4	-47.2	-40.3	-52.0	-48.7			
	Medida 4	-55.3	-47.9	-40.9	-55.1	-49.8			
450	Medida 1	-53.6	-35.0	-51.0	-29.8	-42.3	-44.5	9.09	-37.6
	Medida 2	-50.5	-37.3	-55.1	-30.7	-43.4			
	Medida 3	-52.0	-36.7	-55.7	-34.3	-44.7			
	Medida 4	-54.6	-38.5	-62.1	-34.3	-47.4			
500	Medida 1	-55.9	-44.3	-45.2	-34.7	-45.0	-46.1	7.00	-47.9
	Medida 2	-57.7	-43.8	-45.1	-34.3	-45.2			
	Medida 3	-57.7	-44.9	-45.8	-35.7	-46.0			
	Medida 4	-59.6	-46.9	-48.3	-37.4	-48.1			
550	Medida 1	-47.3	-44.5	-45.5	-36.1	-43.4	-45.3	4.85	-46.3
	Medida 2	-50.3	-44.9	-49.7	-36.9	-45.4			
	Medida 3	-51.9	-45.0	-48.8	-37.0	-45.6			
	Medida 4	-50.5	-45.7	-53.8	-37.7	-46.9			
650	Medida 1	-45.6	-47.3	-46.7	-40.3	-45.0	-47.3	3.30	-38.4
	Medida 2	-46.7	-47.9	-50.3	-40.5	-46.3			
	Medida 3	-47.0	-49.2	-51.2	-43.9	-47.8			

	Medida 4	-49.3	-52.3	-53.8	-45.3	-50.2			
700	Medida 1	-31.3	-25.4	-24.1	-27.8	-27.1	-28.4	1.74	-12.6
	Medida 2	-30.3	-27.8	-27.8	-27.6	-28.4			
	Medida 3	-31.0	-26.9	-30.4	-28.9	-29.3			
	Medida 4	-28.0	-29.4	-30.5	-27.0	-28.8			
750	Medida 1	-40.6	-39.8	-43.7	-43.9	-42.0	-44.0	2.47	-39.1
	Medida 2	-43.0	-42.9	-44.2	-43.8	-43.5			
	Medida 3	-41.2	-44.8	-47.9	-45.2	-44.8			
	Medida 4	-41.7	-43.5	-51.1	-46.8	-45.8			
800	Medida 1	-46.5	-37.6	-46.0	-36.5	-41.6	-44.1	5.91	-42.9
	Medida 2	-48.5	-39.1	-52.4	-36.7	-44.2			
	Medida 3	-49.1	-40.3	-51.1	-36.6	-44.3			
	Medida 4	-49.2	-38.9	-58.6	-38.2	-46.2			
850	Medida 1	-53.1	-55.6	-40.4	-37.2	-46.6	-47.0	5.86	-55.9
	Medida 2	-52.0	-53.4	-43.0	-37.7	-46.5			
	Medida 3	-54.3	-52.8	-44.8	-38.8	-47.7			
	Medida 4	-53.9	-52.8	-42.0	-41.1	-47.4			
900	Medida 1	-51.4	-49.0	-44.4	-36.6	-45.4	-46.6	4.95	-50.4
	Medida 2	-52.3	-47.0	-47.2	-37.2	-45.9			
	Medida 3	-54.0	-49.3	-47.1	-37.6	-47.0			
	Medida 4	-54.3	-49.3	-48.5	-40.1	-48.0			
950	Medida 1	-48.2	-41.6	-42.0	-37.0	-42.2	-44.1	4.79	-48.6
	Medida 2	-50.1	-41.6	-45.9	-36.1	-43.4			
	Medida 3	-52.2	-43.0	-47.4	-35.9	-44.6			
	Medida 4	-51.9	-44.6	-50.7	-38.0	-46.3			
1050	Medida 1	-28.3	-26.2	-22.3	-24.7	-25.4	-27.0	2.61	-26.4
	Medida 2	-29.9	-26.6	-21.6	-26.5	-26.2			
	Medida 3	-30.5	-28.2	-22.9	-27.1	-27.2			
	Medida 4	-31.0	-29.2	-27.0	-30.7	-29.5			
1100	Medida 1	-38.4	-39.0	-45.4	-43.9	-41.7	-44.4	3.94	-43.5
	Medida 2	-41.0	-41.3	-43.3	-45.9	-42.9			
	Medida 3	-41.7	-43.5	-48.5	-47.1	-45.2			
	Medida 4	-41.1	-43.7	-55.7	-50.8	-47.8			

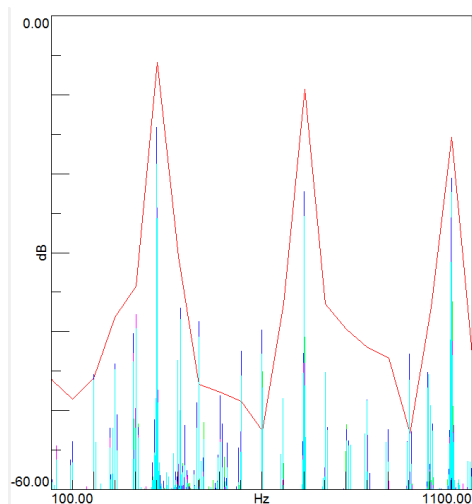


Figura 7.18 Gráfico no LMS dos dados experimentais e numéricos: 3000 rpm, EV ON, T=80°C

Tabela 7.19 Valores de ruído para 3000 rpm, EV ON, T=80°C

3000 rpm ON									
Frequência (Hz)	Nº de ensaio	Bomba 1	Bomba 2	Bomba 3	Bomba 4	Média	Média Total	Desvio Padrão	Numérico (dB)
150	Medida 1	-53.91	-49.76	-39.5	-43.48	-46.7	-49.3	4.7	-48.55
	Medida 2	-56.66	-49.45	-44.57	-47.56	-49.6			
	Medida 3	-56.76	-48	-46.56	-46.73	-49.5			
	Medida 4	-60.94	-50.7	-45.91	-47.85	-51.4			
200	Medida 1	-45.39	-41.28	-42.23	-46.04	-43.7	-45.6	2.0	-45.94
	Medida 2	-46.15	-45.56	-47.2	-47.22	-46.5			
	Medida 3	-48.48	-44.19	-47.63	-44.18	-46.1			
	Medida 4	-47.64	-42.89	-45.09	-49.22	-46.2			
250	Medida 1	-44.85	-43.21	-55.38	-42.53	-46.5	-48.3	3.8	-38.2
	Medida 2	-48.22	-45.48	-53.32	-46.5	-48.4			
	Medida 3	-44.1	-44.73	-54.48	-48.78	-48.0			
	Medida 4	-46.77	-46.03	-55.33	-52.58	-50.2			
300	Medida 1	-37.79	-40.91	-42.51	-39.78	-40.2	-39.7	2.0	-34.31
	Medida 2	-38.43	-36.19	-42.74	-36.61	-38.5			
	Medida 3	-38.62	-38.54	-41.04	-37.19	-38.8			
	Medida 4	-39.61	-39.19	-44.12	-41.83	-41.2			
350	Medida 1	-14.08	-17	-15.63	-13.58	-15.1	-17.1	1.7	-5.83
	Medida 2	-18.73	-15.25	-17.1	-17.55	-17.2			
	Medida 3	-18.79	-15.46	-18.62	-17.34	-17.6			
	Medida 4	-17.9	-20.53	-17.73	-17.83	-18.5			
400	Medida 1	-45.89	-37.18	-47.48	-38.72	-42.3	-42.2	4.2	-30.2
	Medida 2	-43.66	-31.21	-45.36	-40.56	-40.2			
	Medida 3	-46.53	-36.2	-47.29	-42.73	-43.2			
	Medida 4	-43.63	-36.99	-49.03	-42.54	-43.0			

450	Medida 1	-38.68	-45.09	-48.78	-31.41	-41.0	-42.1	5.2	-46.43
	Medida 2	-40.73	-38.51	-49.42	-33.67	-40.6			
	Medida 3	-45.26	-42.24	-51.52	-34.76	-43.4			
	Medida 4	-42.93	-43.91	-49.43	-36.9	-43.3			
500	Medida 1	-48.13	-36.34	-43.51	-42.23	-42.6	-44.4	5.3	-47.66
	Medida 2	-52.34	-33.71	-47.66	-42.99	-44.2			
	Medida 3	-53.62	-37.95	-48.48	-41.48	-45.4			
	Medida 4	-53.99	-37.4	-48.26	-41.62	-45.3			
550	Medida 1	-42.45	-49.01	-47.67	-42.12	-45.3	-48.4	3.7	-48.83
	Medida 2	-45.58	-48.31	-47.24	-44.23	-46.3			
	Medida 3	-46.74	-50.12	-52.82	-50.41	-50.0			
	Medida 4	-45.36	-56.53	-54.82	-50.66	-51.8			
650	Medida 1	-49.22	-46.5	-48.9	-43.78	-47.1	-48.4	2.7	-36.71
	Medida 2	-49.67	-48.9	-47.26	-42.57	-47.1			
	Medida 3	-48.43	-51.53	-50.01	-44.11	-48.5			
	Medida 4	-53.58	-52.14	-51.22	-45.91	-50.7			
700	Medida 1	-22.25	-28.02	-20.99	-26.49	-24.4	-26.5	2.1	-9.25
	Medida 2	-28.86	-25.98	-23.89	-28.62	-26.8			
	Medida 3	-25.41	-26.2	-27.91	-27.73	-26.8			
	Medida 4	-26.04	-28.93	-28.75	-27.53	-27.8			
750	Medida 1	-45.69	-49.4	-45.91	-48.03	-47.3	-49.3	2.5	-35.96
	Medida 2	-45.19	-50.43	-48.83	-48.26	-48.2			
	Medida 3	-46.8	-49.74	-53.17	-48.64	-49.6			
	Medida 4	-51.05	-52.78	-50.45	-54.91	-52.3			
800	Medida 1	-52.62	-41.11	-54.01	-41.92	-47.4	-49.8	6.7	-39.62
	Medida 2	-51.77	-40.73	-59.26	-41.97	-48.4			
	Medida 3	-56.92	-42.52	-60.09	-46.89	-51.6			
	Medida 4	-53.76	-41.82	-64.73	-46.3	-51.7			
850	Medida 1	-48.66	-53.2	-50.34	-48.14	-50.1	-52.3	2.8	-41.95
	Medida 2	-48.73	-54.43	-53.72	-49.51	-51.6			
	Medida 3	-50.75	-56.36	-55.48	-49.66	-53.1			
	Medida 4	-51.65	-57.27	-57.75	-51.41	-54.5			
900	Medida 1	-52.38	-50.11	-48.92	-51.56	-50.7	-52.2	2.6	-43.35
	Medida 2	-57.03	-50.27	-47.64	-52.63	-51.9			
	Medida 3	-56.5	-49.5	-51.25	-53.6	-52.7			
	Medida 4	-56.47	-50.07	-51.1	-56.72	-53.6			
950	Medida 1	-42.82	-44.93	-50.11	-44.82	-45.7	-47.9	2.4	-52.61
	Medida 2	-46.36	-48.01	-50.57	-46.99	-48.0			
	Medida 3	-48.67	-47.87	-51.57	-48.17	-49.1			
	Medida 4	-46.12	-48.8	-54	-46.79	-48.9			

1050	Medida 1	-20.55	-22.94	-27.28	-22.15	-23.2	-25.5	3.8	-15.37
	Medida 2	-25.53	-22.53	-32.4	-23.4	-26.0			
	Medida 3	-22.34	-22.91	-33.8	-23.19	-25.6			
	Medida 4	-24.75	-24.09	-35.43	-25.28	-27.4			
1100	Medida 1	-45.35	-43.36	-49.99	-43.98	-45.7	-47.5	3.7	-42.84
	Medida 2	-45.47	-43.1	-54.81	-45.35	-47.2			
	Medida 3	-47.5	-45.34	-55.09	-43.82	-47.9			
	Medida 4	-48.32	-45.9	-56.01	-46.98	-49.3			

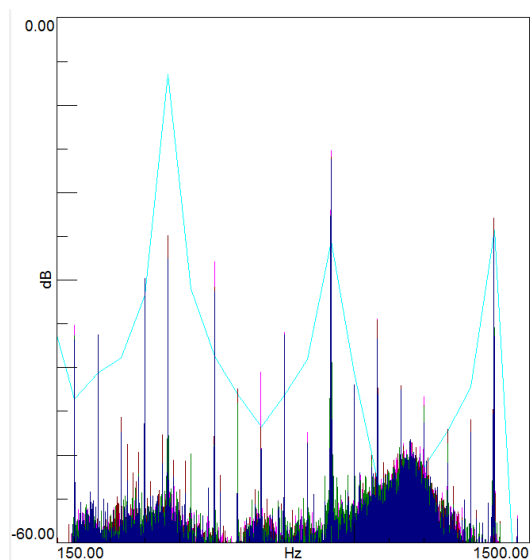


Figura 7.19 Gráfico no LMS dos dados experimentais e numéricos: 4000 rpm, EV OFF, T=80°C

Tabela 7.20 Valores de ruído para 4000 rpm, EV OFF, T=80°C

4000 rpm OFF									
Frequência (Hz)	Nº de ensaio	Bomba 1	Bomba 2	Bomba 3	Bomba 4	Média	Desvio Padrão	Média Total	Numérico (dB)
200	Medida 1	-46.36	-47.45	-41.03	-35.15	-42.5	6.3	-45.4	-43.6
	Medida 2	-47.03	-49.04	-43.62	-36.4	-44.0			
	Medida 3	-47.27	-51.65	-52.37	-36.34	-46.9			
	Medida 4	-50.24	-57.29		-36.76	-48.1			
267	Medida 1	-43.23	-44.29	44.39	-36.23	-19.8	21.4	-37.5	-40.2
	Medida 2	-45.3	-39.31	-48.84	-37.74	-42.8			
	Medida 3	-47.85	-41.55	-43.18	-37.8	-42.6			
	Medida 4	-49.34	-43.03		-41.62	-44.7			
333	Medida 1	-47.71	-41.78		-45.7	-45.1	4.1	-47.8	-38.8
	Medida 2	-49.39	-43.39		-46.45	-46.4			
	Medida 3	-54.35	-44.85		-47.39	-48.9			
	Medida 4	-57.71	-45.44		-49.52	-50.9			

400	Medida 1	-31.7	-41.99	-41	-33.53	-37.1	6.1	-37.6	-31.7
	Medida 2	-32.56	-41.66	-45.54	-30.42	-37.5			
	Medida 3	-33.47	-46.32	-46.34	-29.8	-39.0			
	Medida 4	-33.91	-45.74		-30.65	-36.8			
467	Medida 1	-16.17	-17.6	-12.42	-24.87	-17.8	4.9	-19.4	-6.5
	Medida 2	-16.19	-17.57	-13.48	-25.8	-18.3			
	Medida 3	-16.82	-21.18	-12.66	-27.56	-19.6			
	Medida 4	-17.47	-19.96		-28.46	-22.0			
600	Medida 1	-48.69	-37.92	-42.1	-27.91	-39.2	7.7	-41.3	-38.7
	Medida 2	-49.44	-40.48	-41.53	-30.81	-40.6			
	Medida 3	-50.55	-40	-51.4	-31.32	-43.3			
	Medida 4	-54.45	-37.74		-34.35	-42.2			
667	Medida 1	-35.96	-35.2	-38.06	-42.39	-37.9	5.2	-41.8	-43.0
	Medida 2	-35.53	-36.7	-43.87	-44.03	-40.0			
	Medida 3	-41.12	-43.76	-45.19	-50.41	-45.1			
	Medida 4	-40.44	-37.84		-54.42	-44.2			
733	Medida 1	-42.46	-39.31	-36.7	-40.55	-39.8	4.8	-44.0	-46.8
	Medida 2	-42.67	-39.65	-36.63	-46.76	-41.4			
	Medida 3	-46.08	-40.36	-48.54	-49.31	-46.1			
	Medida 4	-50.28	-42.8		-53.11	-48.7			
800	Medida 1	-44.14	-37.04	-46.46	-36.23	-41.0	5.1	-42.8	-43.2
	Medida 2	-46.89	-37.86	-47.81	-37.9	-42.6			
	Medida 3	-47.6	-40.13	-53.15	-35.96	-44.2			
	Medida 4	-48.24	-42.88		-38.52	-43.2			
867	Medida 1	-44.14	-41.95	-47.27	-47.43	-45.2	2.5	-46.6	-39.1
	Medida 2	-46.89	-43.04	-47.38	-48.61	-46.5			
	Medida 3	-47.6	-43	-48.74	-48.66	-47.0			
	Medida 4	-48.24	-43.7		-51.18	-47.7			
933	Medida 1	-21.07	-21.24	-13.24	-15.91	-17.9	2.9	-19.6	-25.5
	Medida 2	-20.54	-20.98	-22.4	-16.23	-20.0			
	Medida 3	-20.29	-20.72	-24.46	-15.2	-20.2			
	Medida 4	-21.64	-21.24		-18.66	-20.5			
1000	Medida 1	-47.86	-52.74	-50.83	-41.95	-48.3	4.4	-50.0	-40.6
	Medida 2	-48.59	-54.98	-54.77	-42.5	-50.2			
	Medida 3	-49.24	-55.34	-53.14	-47.07	-51.2			
	Medida 4	-49.91	-56.47		-44.32	-50.2			
1067	Medida 1	-46.1	-43.11	-47.09	-34.48	-42.7	7.6	-45.0	-53.1
	Medida 2	-48.12	-43.47	-50.7	-36.72	-44.8			
	Medida 3	-48.08	-44.75	-67.5	-34.65	-48.7			
	Medida 4	-47.34	-46.38		-37.78	-43.8			

1133	Medida 1	-43.09	-49.27	-56.21	-42.02	-47.6	5.5	-48.3	-63.4
	Medida 2	-44.15	-48.45	-58.33	-42.56	-48.4			
	Medida 3	-46.58	-47.89	-61.63	-45.08	-50.3			
	Medida 4	-45.5	-48.88		-46.39	-46.9			
1200	Medida 1	-46	-34.32	-54.2	-43.3	-44.5	7.8	-45.3	-51.4
	Medida 2	-47.77	-34.74	-57.38	-44.52	-46.1			
	Medida 3	-47.72	-34.38	-61.76	-44.36	-47.1			
	Medida 4	-48.75	-35.42		-46.34	-43.5			
1333	Medida 1	-36.61	-40.94	-53.98	-45.92	-44.4	8.5	-45.6	-42.2
	Medida 2	-37.39	-41.43	-62.3	-45.93	-46.8			
	Medida 3	-40.2	-39.78	-67.4	-47.37	-48.7			
	Medida 4	-38.03	-41.35		-48.93	-42.8			
1400	Medida 1	-18.49	-17.35	-30.4	-22.95	-22.3	5.7	-23.5	-24.3
	Medida 2	-17.85	-19.41	-33.34	-24.9	-23.9			
	Medida 3	-17.36	-20.46	-35.73	-27.1	-25.2			
	Medida 4	-18.48	-20.4		-28.63	-22.5			
1466	Medida 1	-54.06	-47.65	-58.78	-56.91	-54.4	4.7	-55.8	-69.2
	Medida 2	-54.18	-50.22	-62.99	-57.32	-56.2			
	Medida 3	-54.64	-50.02	-65.41	-60.28	-57.6			
	Medida 4	-54.11	-51.52		-59.06	-54.9			

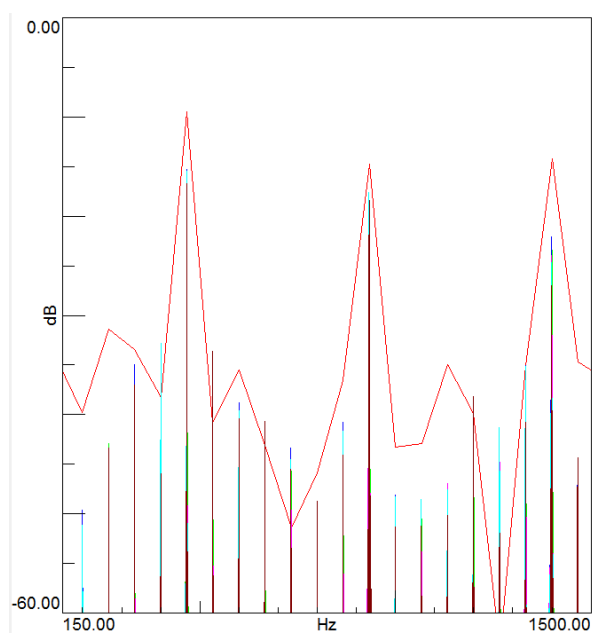


Figura 7.20 Gráfico no LMS dos dados experimentais e numéricos: 4000 rpm, EV ON, T=80°C

Tabela 7.21 Valores de ruído para 4000 rpm, EV OFF, T=80°C

4000 rpm ON									
Frequência (Hz)	Nº de ensaio	Bomba 1	Bomba 2	Bomba 3	Bomba 4	Média	Média Total	Desvio Padrão	Numérico (dB)
200	Medida 1	-49.68	-41.5	-45.39	-53.9	-47.6	-49.7	4.9	-39.81
	Medida 2	-51.2	-44.21	-47.59	-54.3	-49.3			
	Medida 3	-51.54	-44.75	-48.69	-56.59	-50.4			
	Medida 4	-53.07	-44.03	-48.78	-60.56	-51.6			
267	Medida 1	-42.93	-40.08	-41.57	-38.55	-40.8	-43.1	2.3	-31.41
	Medida 2	-43.89	-43.84	-43.63	-39.78	-42.8			
	Medida 3	-44.09	-44.2	-43.73	-43.4	-43.9			
	Medida 4	-48.86	-44.5	-45.55	-40.93	-45.0			
333	Medida 1	-38.45	-46.88	-37.91	-36.65	-40.0	-41.5	6.4	-33.4
	Medida 2	-34.93	-50.63	-37.71	-37.95	-40.3			
	Medida 3	-37.13	-57.65	-38.46	-37.01	-42.6			
	Medida 4	-40.24	-53.93	-39.14	-39.5	-43.2			
400	Medida 1	-32.9	-47.57	-29.82	-42.77	-38.3	-39.7	5.7	-38.26
	Medida 2	-32.85	-43.99	-34.17	-43.19	-38.6			
	Medida 3	-35.1	-44.5	-35.86	-45.8	-40.3			
	Medida 4	-33.78	-47.79	-38.51	-46	-41.5			
467	Medida 1	-15.43	-16.39	-14.47	-16.69	-15.7	-17.7	1.8	-9.47
	Medida 2	-15.29	-19.59	-16.34	-18.43	-17.4			
	Medida 3	-18.25	-20.19	-16.73	-18.97	-18.5			
	Medida 4	-17.62	-21.38	-18.49	-19.24	-19.2			
600	Medida 1	-38.77	-44.5	-37.36	-40.45	-40.3	-43.5	3.7	-35.57
	Medida 2	-39.61	-47.91	-40.17	-48.71	-44.1			
	Medida 3	-40.96	-48.09	-40.93	-47.65	-44.4			
	Medida 4	-40.81	-47.45	-46.48	-46.9	-45.4			
667	Medida 1	-42.39	-44.53	-47.35	-40.7	-43.7	-48.1	4.5	-43.06
	Medida 2	-43.8	-48.19	-53.97	-45.12	-47.8			
	Medida 3	-46.53	-55.01	-51.8	-46.99	-50.1			
	Medida 4	-44.62	-52.71	-57.02	-48.34	-50.7			
733	Medida 1	-43.39	-40.24	-46.98	-45.54	-44.0	-47.2	3.3	-51.35
	Medida 2	-44.52	-42.41	-48.8	-49.56	-46.3			
	Medida 3	-45.67	-45.23	-49.69	-51.37	-48.0			
	Medida 4	-47.35	-49.59	-51.16	-53	-50.3			
800	Medida 1	-58.53	-49.35	-46.11	-47.71	-50.4	-52.9	5.3	-45.89
	Medida 2	-59.59	-54.44	-47.3	-48.73	-52.5			
	Medida 3	-62.09	-53.91	-50.26	-49.41	-53.9			
	Medida 4	-64.67	-51.76	-52.68	-49.3	-54.6			
867	Medida 1	-41.65	-49.42	-43.54	-40.61	-43.8	-46.1	4.9	-36.62
	Medida 2	-40.82	-55.28	-44.49	-43.06	-45.9			
	Medida 3	-41.65	-55.57	-43.7	-44.1	-46.3			

	Medida 4	-45.25	-55.81	-46.4	-46.12	-48.4			
933	Medida 1	-17.77	-16.24	-16.84	-17.47	-17.1	-18.6	1.1	-14.8
	Medida 2	-17.6	-18.97	-18.71	-18.38	-18.4			
	Medida 3	-18.68	-20.23	-18.27	-19.13	-19.1			
	Medida 4	-20.47	-19.75	-19.64	-19.13	-19.7			
1000	Medida 1	-48.1	-47.24	-46.09	-48.88	-47.6	-51.6	3.7	-42.99
	Medida 2	-48.31	-50.85	-50.17	-48.97	-49.6			
	Medida 3	-53.17	-56.13	-54.08	-51.37	-53.7			
	Medida 4	-49.64	-57.79	-57.71	-57.07	-55.6			
1067	Medida 1	-48.53	-45.23	-40.37	-44.81	-44.7	-48.2	3.8	-42.91
	Medida 2	-49.41	-51.23	-44.69	-45.63	-47.7			
	Medida 3	-50.64	-47.44	-47.74	-46.31	-48.0			
	Medida 4	-50.33	-48.92	-58.63	-51.23	-52.3			
1133	Medida 1	-46.91	-41.99	-41.72	-48.6	-44.8	-49.3	4.3	-34.99
	Medida 2	-47.59	-47.39	-42.05	-50.21	-46.8			
	Medida 3	-51.04	-53.15	-49.68	-52.04	-51.5			
	Medida 4	-53.48	-57.29	-50.87	-54.31	-54.0			
1200	Medida 1	-42.12	-44.23	-43.83	-37.17	-41.8	-44.9	5.5	-39.8
	Medida 2	-42.4	-49.4	-44.08	-37.65	-43.4			
	Medida 3	-45.87	-51.96	-46.29	-39.81	-46.0			
	Medida 4	-45.24	-59.71	-49.97	-38.2	-48.3			
1333	Medida 1	-36.94	-44.22	-37.92	-36.5	-38.9	-42.1	5.6	-35.38
	Medida 2	-35.05	-49.41	-42.83	-39.93	-41.8			
	Medida 3	-35.1	-53.51	-47.69	-40.36	-44.2			
	Medida 4	-36.06	-50.1	-47.24	-40.75	-43.5			
1400	Medida 1	-22.08	-26.71	-28.08	-26.1	-25.7	-27.0	2.6	-14.21
	Medida 2	-23.41	-24.47	-27.84	-27.18	-25.7			
	Medida 3	-23.94	-28.75	-31.32	-27	-27.8			
	Medida 4	-24.64	-28.05	-31.79	-30.31	-28.7			
1466	Medida 1	-51.56	-41.45	-47.2	-43.61	-46.0	-46.7	3.1	-34.42
	Medida 2	-47.1	-44.4	-46.66	-45.02	-45.8			
	Medida 3	-51.02	-45.77	-50.44	-44.37	-47.9			
	Medida 4	-51.9	-41.45	-48.77	-46.66	-47.2			

7.6 Código matlab para processamento dos dados experimentais

```

clear all
close all
clc

A={'3000_bomba1_ON_1.mat';'3000_bomba1_ON_2.mat';'3000_bomba1_ON_3.mat';'
3000_bomba1_ON_4.mat';

'3000_bomba2_ON_1.mat';'3000_bomba2_ON_2.mat';'3000_bomba2_ON_3.mat';'300
0_bomba2_ON_4.mat';

'3000_bomba3_ON_1.mat';'3000_bomba3_ON_2.mat';'3000_bomba3_ON_3.mat';'300
0_bomba3_ON_4.mat';

'3000_bomba4_ON_1.mat';'3000_bomba4_ON_2.mat';'3000_bomba4_ON_3.mat';'300
0_bomba4_ON_4.mat'};

Valores_relevantes=[];

for n=1:length(A)

%sacar nome do ficheiro
filename=A{n};
name=filename(1:end-6);

%processamento da transformada de fourier
load(filename);
valores_pressao=Signal.y_values.values;
valores_pressao=valores_pressao/1e5;
t=Signal.x_values.start_value:Signal.x_values.increment:31;
t=t(1:Signal.x_values.number_of_values);
N=Signal.x_values.number_of_values; %numero de dados
NFFT=2^nextpow2(N);
fs=N/(t(end)-(t(1))); %sample rate, number of samples per second
df=fs/N; %frequency increment
f=fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
S=fft(valores_pressao,NFFT)/N;
S=2*abs(S(1:NFFT/2+1));
db=20*log10(S);
figure(n)
plot(f,db);
axis([37 1200 -100 0])

%sacar os valores pretendidos
H1=3000/60;

for n=1:23
    [value(n),b]=findMaxInInterval(f,db,[H1*n-5,H1*n+5]);
end
Valores_relevantes=[Valores_relevantes value'];

End

```